



UNIVERSITE D'EVRY VAL D'ESSONNE

ECOLE DOCTORALE "SITEVRY"

THESE

Présentée par

Moez JERBI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : RESEAUX ET INFORMATIQUE

Protocoles pour les communications dans les réseaux de

véhicules en environnement urbain :

Routage et GeoCast basés sur les intersections

Soutenue publiquement le 06 Novembre 2008 devant le jury formé de :

André-Luc BEYLOT	<i>Professeur, INP Toulouse</i>	Président
Christian BONNET	<i>Professeur, Institut Eurecom</i>	Rapporteur
Bertrand DUCOURTHIAL	<i>MdC, Université de Technologie Compiègne</i>	Rapporteur
Paul MUHLETHALER	<i>Directeur de recherche, INRIA</i>	Examineur
Javier-Manuel GOZALVEZ-SEMPERE	<i>Professeur, University Miguel Hernandez</i>	Examineur
Nazim AGOULMINE	<i>Professeur, Université d'Evry</i>	Directeur de thèse
Yacine GHAMRI-DOUDANE	<i>MdC, ENSIIE</i>	Co-Encadreur de thèse
Sidi-Mohammed SENOUCI	<i>Chef de projet, France Telecom R&D - Orange Labs</i>	Co-Encadreur de thèse

*A mes parents,
à tous ceux que j'aime,
et à tous ceux qui m'aiment...*

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier vivement Monsieur Bertrand Ducourthial et Monsieur Christian Bonnet d'avoir accepté d'être rapporteurs de mes travaux et Monsieur André-Luc Beylot de bien avoir voulu présider mon jury de thèse. Merci également à Messieurs Paul Muhlethaler et Javier-Manuel Gozalvez-Sempere pour leur participation à ce jury.

Je remercie bien évidemment le professeur Nazim Agoulmine d'avoir dirigé cette thèse. Merci également à Sidi-Mohammed Senouci et Yacine Ghamri-Doudane d'avoir encadré cette thèse. Ces années de travail en commun m'ont beaucoup appris scientifiquement et humainement. Je souhaite à tous les doctorants d'avoir des encadreurs de thèse aussi généreux et aussi enclins à partager leur savoir, leur travail et leur temps. Notre collaboration va bien entendu se poursuivre pour mon plus grand plaisir.

Les débuts de mes travaux sur les réseaux de véhicules remontent à l'année 2005 et ont été possibles grâce à mon intégration au sein de l'équipe M2I/R2A à France Télécom R&D – Orange Labs. Merci à Yvon Gourhant qui m'a accueilli dans cette équipe et qui a soutenu dès le début mes initiatives autour de ce thème.

Je veux bien évidemment remercier les personnes avec qui j'ai travaillé durant ces années, car sans collectif, rien n'est possible :

- Mes collègues de l'équipe M2I/R2A pour leur aide et les discussions enrichissantes sur les réseaux spontanés. Je remercie plus particulièrement : Tinku Rasheed et Rabah Meraihi qui m'ont fait confiance dès le début en s'investissant pleinement dans ces problématiques de télécommunication. J'espère que nous continuerons à travailler ensemble avec la même envie et la même bonne humeur ;

- Les étudiants qui m'ont accompagné au cours de cette thèse et j'espère que nos échanges auront été aussi enrichissants pour eux, qu'ils l'ont été pour moi : merci donc à Mahmoud Alhadj, Patrick Marlier et Ismail Salhi;

- Les membres du laboratoire LRSM pour leur accueil, leur aide et leur gentillesse;

- Je remercie aussi Monique Lemarchand, Sylvie Gillot et Veronique Ruen pour avoir su assurer avec efficacité et persévérance les questions de logistiques et missions autour de mes activités.

Merci aussi à Sophie pour sa relecture attentive de ce manuscrit, à Tlich pour les discussions enrichissantes que nous avons eues et à tous ceux, habitués ou occasionnels des pauses café, pour les bons moments partagés.

Je remercie également Walid Saddi et Alaeddine Abdallah, mes deux co-locataires avec qui j'ai partagé beaucoup durant ces trois années de thèse. Merci aussi à tous mes amis de Lannion et d'ailleurs (Yassine, Ryadh, Usman, Imène, Nassima, Sakku, Dali, Oussama, Hicham, Meng,

Thomas, Sofiène, Lyes, Hmed, Tlich, Htira et tant d'autres que je ne nommerai pas par manque de place et de peur de ne pas être exhaustif).

Je profite également de ce moment privilégié pour remercier mes parents, ma sœur et mes frères pour leur soutien sans faille, leurs encouragements et sans qui rien n'aurait été possible. Je remercie plus particulièrement mon frère Mourad qui a compté dans mon parcours.

Enfin, je tiens à remercier Nour pour sa présence et son soutien indéfectible même dans les moments difficiles. Elle a su m'accompagner dans cette grande expérience scientifique mais surtout personnelle qu'est une thèse.

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

RÉSUMÉ

Les réseaux véhiculaires sont passés du stade de simple curiosité pour revêtir aujourd'hui un intérêt certain aussi bien du point de vue de l'industrie automobile que des opérateurs de réseaux et services. Ces réseaux sont en effet une classe émergente de réseaux sans fil permettant des échanges de données entre véhicules ou encore entre véhicules et infrastructure. Ils suscitent un intérêt certain aussi bien en Europe qu'au Japon et en Amérique du Nord, dans le but de fournir de nouvelles technologies capables d'améliorer la sécurité et l'efficacité des transports routiers.

Suivant cette même vision, nous nous intéressons dans cette thèse aux communications inter-véhicules dans un environnement urbain. Notre objectif est de proposer des solutions de routage ad hoc et de dissémination géolocalisée, adaptées à un environnement ville, répondant à la fois aux exigences et besoins technologiques des cas d'utilisation envisagés (principalement des services d'information et de confort), mais aussi et surtout aux contraintes des communications inter-véhiculaires ad hoc (fragmentation fréquente du réseau, connectivité intermittente, etc).

Notre démarche consiste à prendre en compte un paramètre clé qui influence le bon fonctionnement du réseau ad hoc de véhicules, à savoir la densité du réseau. Dans un premier temps, nous proposons un mécanisme distribué qui permet de caractériser de manière plus fine la densité de trafic d'un tronçon de route entre deux intersections, en fournissant une distribution spatiale des véhicules mobiles sur la voie de circulation. Ensuite, nous proposons un nouveau protocole de routage géographique, qui tire partie des caractéristiques des voies urbaines et qui intègre le mécanisme d'estimation de densité de trafic pour le routage des paquets. Pour finir, et afin de compléter les mécanismes de communication véhiculaire ad hoc (couche réseau) proposés, nous nous intéressons à la dissémination des données. Nous proposons un nouveau mécanisme distribué et ad hoc qui permet d'émuler le fonctionnement d'une infrastructure classique destinée à diffuser localement (au niveau d'une intersection) des paquets de données de manière périodique.

Certains aspects de nos solutions sont évalués analytiquement alors que leurs performances sont évaluées par simulation à l'aide de l'outil QNAP, du simulateur QualNet et du modèle de mobilité réaliste VanetMobiSim.

Mots-clés: Réseaux véhiculaires ad hoc, Environnement urbain, Communications basées sur les intersections, Routage Multi-sauts, Dissémination, Densité du trafic routier, Evaluation de performances.

ABSTRACT

Inter-Vehicle Communication (IVC) is attracting considerable attention from the research community and the automotive industry, where it is beneficial in providing Intelligent Transportation System (ITS) as well as assistant services for drivers and passengers. In this context, Vehicular Networks are emerging as a novel category of wireless networks, spontaneously formed between moving vehicles equipped with wireless interfaces that could have similar or different radio interface technologies, employing short-range to medium-range communication systems.

The distinguished characteristics of vehicular networks such as high mobility, potentially large scale, and network partitioning introduce several challenges, which can greatly impact the future deployment of these networks.

In this thesis, we focus on inter-vehicle communication in urban environments. Our main goal is to propose new routing and dissemination algorithms, which efficiently adapts to the vehicular networks characteristics and applications.

Temporary disconnection in vehicular network is unavoidable. It is thereby of imminent practical interest to consider the vehicular traffic density. Therefore, at first, we propose a completely distributed and infrastructure-free mechanism for city road density estimation. Then, and based on such traffic information system, we propose a novel intersection-based geographical routing protocol, capable to find robust and optimal routes within urban environments. Finally, in order to help the efficient support of dissemination-based applications, a self-organizing mechanism to emulate a geo-localized virtual infrastructure is proposed, which can be deployed in intersections with an acceptable level of vehicular density. The advocated techniques are evaluated by a combination of network simulation and a microscopic vehicular traffic model.

Keywords: Vehicular Networks, IEEE 802.11, Urban environments, Intersections-based, Multi-hop routing, Vehicular traffic density, Geolocalized dissemination, Performance evaluation.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	xi
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xix
1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 MOTIVATIONS.....	1
1.2 CONTRIBUTIONS DE CETTE THESE	2
1.3 ORGANISATION DE LA THESE.....	3
2 RESEAUX DE VEHICULES : DIFFERENTES APPROCHES, CARACTERISTIQUES ET VERROUS	5
2.1 INTRODUCTION	5
2.2 RESEAUX DE VEHICULES : DEFINITION DE LA TECHNOLOGIE.....	6
2.2.1 Services et applications des réseaux de véhicules.....	6
2.2.2 Architectures de réseaux de véhicules.....	6
2.2.2.1 Communications de Véhicule à Véhicule (V2V)	7
2.2.2.2 Communications de Véhicule à Infrastructure (V2I).....	7
2.2.2.3 Communications hybrides	8
2.2.3 Technologies de communication sans fil potentielles pour les réseaux de véhicules	8
2.2.3.1 Les solutions radio existantes	8
2.2.3.2 Utilisation de la norme 802.11 pour les communications inter-véhicules	12
2.3 RESEAUX DE VEHICULES : ACTEURS, PROJETS ET STANDARDISATION.....	13
2.3.1 Principaux acteurs dans le domaine des VANETs	13
2.3.1.1 Les organisations gouvernementales	13
2.3.1.2 Les industriels.....	14
2.3.1.3 Les universités et centres de recherche	16
2.3.2 Les projets en cours	16
2.3.3 Travaux de standardization et de normalization	18
2.3.3.1 DSRC et IEEE 802.11p	18
2.3.3.2 ISO : TC204/WG16 - CALM	19
2.3.3.3 ETSI : TC ITS	20
2.3.3.4 Le consortium Car-to-Car (C2C-CC)	20
2.4 CARACTERISTIQUES, CONTRAINTES ET DEFIS	21
2.4.1 Caractéristiques des réseaux de véhicules	21
2.4.2 Challenges pour la mise en place des réseaux de véhicules	22

2.4.2.1	Challenges socio-économiques.....	22
2.4.2.2	Challenges techniques	23
2.5	PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS : LE DEFI DU ROUTAGE ET DE LA DISSEMINATION	24
3	IFTIS : UN MECANISME DISTRIBUE POUR L'ESTIMATION DU TRAFIC ROUTIER DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN.....	27
3.1	INTRODUCTION	27
3.2	PROBLEMATIQUE POSEE	28
3.3	APPROCHES EXISTANTES	28
3.4	UN MECANISME DISTRIBUE POUR L'ESTIMATION DU TRAFIC ROUTIER.....	30
3.4.1	Hypothèses	30
3.4.2	Description détaillée du mécanisme.....	30
3.4.2.1	Découpage du tronçon et formation des groupes.....	30
3.4.2.2	Génération, envoi et analyse des paquets d'agrégation CDP	31
3.5	EVALUATION DES PERFORMANCES	35
3.5.1	Environnement de simulation	35
3.5.1.1	Le simulateur Qualnet.....	35
3.5.1.2	Le modèle de mobilité VanetMobiSim	38
3.5.2	Evaluation des performances d'IFTIS	40
3.5.2.1	Scénario et paramètres de simulation	40
3.5.2.2	Résultats de simulation et analyse des performances.....	41
3.6	DISCUSSION	45
3.7	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	46
4	GYTAR : UN PROTOCOLE DE ROUTAGE GEOGRAPHIQUE POUR LES RESEAUX DE VEHICULES DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN.....	47
4.1	INTRODUCTION	47
4.2	PROBLEME DE ROUTAGE DANS LES RESEAUX DE VEHICULES	48
4.3	PANORAMA DES PROTOCOLES DE ROUTAGE AD HOC EXISTANTS.....	48
4.3.1	Protocoles de routage pour les MANETs.....	48
4.3.2	Protocoles de routage pour VANETs	51
4.3.3	Besoin d'un nouveau protocole	52
4.4	UNE SOLUTION DE ROUTAGE GEOGRAPHIQUE BASEE SUR LES INTERSECTIONS.....	54
4.4.1	Hypothèses et préliminaires.....	54
4.4.2	Description détaillée du protocole.....	55
4.4.2.1	Choix dynamique des intersections	55
4.4.2.2	Approche gloutonne améliorée.....	62
4.4.2.3	Solution de recouvrement local	64
4.5	EVALUATION DES PERFORMANCES	66
4.5.1	Paramètres de simulation	66
4.5.2	Résultats des simulations et analyse des performances.....	67

4.5.2.1	Sensibilité des paramètres α et β	68
4.5.2.2	Performances de GyTAR – Comparaison avec d'autres protocoles	69
4.6	DISCUSSION	73
4.7	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	74
5	GVI : UN MECANISME D'EMULATION D'UNE INFRASTRUCTURE DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN	75
5.1	INTRODUCTION	75
5.2	PROBLEMATIQUE POSEE	76
5.3	DISSEMINATION ET DIFFUSION DE DONNEES DANS VANETS	76
5.3.1	La géo-diffusion	76
5.3.2	La dissémination dans les réseaux de véhicules : nécessité de l'infrastructure	78
5.4	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE GVI.....	80
5.4.1	Hypothèses	80
5.4.2	Description détaillée du protocole	80
5.4.2.1	Première étape : sélection des véhicules candidats	81
5.4.2.2	Deuxième étape : election du véhicule diffuseur	83
5.4.2.3	Synthèse	90
5.5	EVALUATION DES PERFORMANCES DE GVI	90
5.5.1	Paramètres de simulations	91
5.5.2	Résultats des simulations et analyse des performances	92
5.6	ANALYSE DU MECANISME GVI	97
5.6.1	Estimation du temps de séjour moyen par une approche analytique	97
5.6.2	Analyse de la probabilité d'échec	101
5.7	DISCUSSION	104
5.8	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	105
6	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	107
6.1	CONCLUSION GENERALE.....	107
6.2	TRAVAUX REALISES	107
6.3	PERSPECTIVES.....	109
	ANNEXE 1 : EXPERIMENTATION DE LA NORME IEEE 802.11 SUR ROUTE .	111
	ANNEXE 2 : LE WAVE OU L'IEEE 802.11P	117
	BIBLIOGRAPHIE	121
	LISTE DES PUBLICATIONS	127

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Types de communication dans un réseau de véhicules.....	7
Figure 2.2 : Les différentes catégories de réseaux sans fil [3].	11
Figure 2.3 : Dynamique autour des réseaux de véhicules [13].....	13
Figure 3.1 : Découpage d'un tronçon de route dans IFTIS.....	31
Figure 3.2 : Format d'un paquet d'agrégation CDP.....	32
Figure 3.3 : Acheminement d'un paquet CDP tout au long d'une voie.	34
Figure 3.4 : Architecture de QualNet.	36
Figure 3.5 : Modèle de réflexion sur sol.....	37
Figure 3.6 : Capture d'écran de l'interface graphique de VanetMobiSim.....	39
Figure 3.7 : Scénario de simulation.	40
Figure 3.8 : Nombre de véhicules de la cellule 1 vs Temps (scénarios densité faible et forte).....	42
Figure 3.9 : Nombre de véhicules de la cellule 2 vs Temps (scénarios densité faible et forte).....	42
Figure 3.10 : Nombre de véhicules de la cellule 4 vs Temps (scénarios densité faible et forte).....	43
Figure 3.11 : Délai de bout en bout vs Temps.	44
Figure 4.1 : Classification des algorithmes de routage ad hoc.	48
Figure 4.2 : Sélection des intersections dans GyTAR.	57
Figure 4.3 : Probabilité d'une connectivité continue.	60
Figure 4.4 : Calcul du score densité d'une voie de circulation.	61
Figure 4.5 : Envoi des données entre deux intersections utilisant une approche gloutonne améliorée. ..	64
Figure 4.6 : Solution de recouvrement local de GyTAR.	65
Figure 4.7 : Scénario de simulation.	66
Figure 4.8 : (a) Taux de délivrance et (b) Délai de bout en bout vs Densité du réseau.	69
Figure 4.9 : Taux de délivrance vs (a) Taux de transmission et (b) Densité du réseau.	70
Figure 4.10 : Délai de bout en bout vs (a) Taux de transmission et (b) Densité du réseau.....	71
Figure 4.11 : Surcharge du routage vs (a) Taux de transmission et (b) Densité du réseau.	72
Figure 5.1 : La géo-diffusion.	77
Figure 5.2 : Environnement urbain avec sa structure en routes croisées.....	81
Figure 5.3 : Sélection des véhicules candidats dans GVI.	82
Figure 5.4 : Sous-étapes d'élection d'un véhicule diffuseur.....	84
Figure 5.5 : Fonction de Gauss pour le calcul du poids.	86
Figure 5.6 : Autre fonction possible pour le calcul du poids : la fonction triangle.	87
Figure 5.7 : Election d'un véhicule diffuseur dans GVI.	89

Figure 5.8 : Simulation en file d'attente.	91
Figure 5.9 : Scénario de simulation.	91
Figure 5.10 : Pourcentage des véhicules non informés vs Période de diffusion T (scénario 1).	93
Figure 5.11 : Nombre moyen de copies du même message vs Période de diffusion T (scénario 1).	95
Figure 5.12 : Pourcentage des véhicules non informés vs Période de diffusion T (scénario 2).	96
Figure 5.13 : Nombre moyen de copies du même message vs Période de diffusion T (scénario 2).	96
Figure 5.14 : Retard moyen, temps de parcours moyen et temps de séjour moyen vs Charge ρ	100
Figure 5.15 : Nombre moyen de copies du même message vs Période de diffusion T (simulation - analytique).....	101
Figure 5.16 : Probabilité d'échec en fonction du débit d'arrivée.....	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Paramètres de simulation.	40
Tableau 4-1 : Exemple de calcul du score densité	60
Tableau 4-2 : Table de voisinage d'un véhicule	62
Tableau 4-3 : Paramètres de simulation	67
Tableau 5-1 : Paramètres de simulation.	92

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AHS	Advanced Cruise-Assist Highway System	DRiVE	Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments
AIFS	Arbitration Inter-Frame Space	DVB-S	Digital Video Broadcasting-Satellite
A-STAR	(Anchor-based Street and Traffic Aware Routing)	ETSI	European Telecommunications Standards Institute
ASV	Advanced Safety Vehicle	EIFS	Extended IFS
BEB	Binary Exponentiel Backoff	FCC	Federal Communication Commission
B-GyTAR	Basic-GyTAR	FEHRL	Forum of European National Highway Research Laboratories
C2C-CC	Car-2-Car Communication Consortium	FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
CALM	Continuous Air-interface, Long and Medium Range	GLS	Greedy Location Service
CAMP	Collision Avoidance metrics Partnership	GPCR	Greedy, Perimeter Coordinator Routing
CARMAN	CAR-based Mobile Ad hoc Network	GPRS	General Packet Radio Service
CBR	Constant Bit Rate	GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	GSM	Global System for Mobile Communication
CVIS	Coopérative. Vehicle-Infrastructure Systems	GSR	Geographic Source Routing
CW	Contention Window	GST	Global System for Telematics
DDT	Distance Defer Transfer	GVI	Geo-localized Virtual Infrastructure
DSRC	Dedicated Short Range Communication	GyTAR	improved-Greedy Traffic-Aware Routing
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	HCM	Highway Capacity Manual
DSSS	Driving Safety Support Systems	IFS	Inter Frame Space
DTN	Delay Tolerant Networks	IFTIS	Infrastructure-Free Traffic Information System

IR	Infra Red	STRAW	STreet RAndom Waypoint
ISM	Industrial, Scientific and Medical	SUMO	Simulation for Urban MObility
ITS	Intelligent Transportation System	UICWS	Urban Intersection Collision Warning System
IVC	Inter Vehicle Communication	UMB	Urban Multi-Hop Broadcast Protocol
LAR	Location Aided Routing	UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
LLC	Logical Link Control	U-NII	Unlicenced-National Information Infrastructure
MAC	Medium Access Control	USDOT	US Department of Transportation
MANET	Mobile Ad hoc Networks	VANET	Vehicular Ad hoc Networks
MORA	MOvement-based Routing Algorithm	VICS	Vehicle Information and Communication System
MOVE	MObility model generator for Vehicular networks	VII	Vehicle Infrastructure Integration
MURU	A MUlti-hop Routing protocol for Urban vehicular ad hoc networks	VSC	Vehicle Safety Consortium
NoW	Network-on-Wheels	VSN	Vehicular Sensor Networks
OBU	On-Board Unit	WAVE	Wireless Ability in Vehicular Environments
ODAM	Optimized Dissemination of Alarm Messages	WLAN	Wireless Local Area Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
PARSEC	PARallel Simulation Environnement for Complex systems	WWAN	Wireless Wide Area Network
QNAP	Queuing Network Analysis Package		
QLS	Qorum-based location service		
RSU	Road Side Units		
RWP	Random Way Point		
SeVeCom	Secure Vehicular Communication		
SIFS	Short IFS		
SOTIS	Self-Organizing Traffic Information System		
STEID	Spatio-Temporal Information		

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Motivations

Les réseaux sans fil font depuis plus d'une dizaine d'années partie intégrante de la vie quotidienne des entreprises, des particuliers, de l'industrie et d'autres organisations. Ils représentent aujourd'hui une des briques de base sur lesquelles vont se fonder les systèmes intelligents omniprésents (*Ubiquitous intelligence*) qui va constituer une des technologies de l'avenir. En effet, les ordinateurs, capteurs, puces, réseaux numériques et autres systèmes électroniques vont participer dans un futur proche à la démocratisation de l'informatique omniprésente, c'est-à-dire la fusion des mondes virtuels et du monde réel afin de créer des environnements "intelligents" qui puissent offrir à leurs usagers une multitude de services hautement disponibles (Systèmes de transport intelligent, maison intelligente, aide et surveillance médicale, etc...) et dont la complexité de la réalisation est invisible à ces mêmes usagers.

Un exemple typique de ces applications, est le système de transport intelligent (ITS, *Intelligent Transportation System*), dont les objectifs principaux sont : (i) l'amélioration de la sécurité des déplacements, (ii) l'amélioration de l'efficacité globale du système de transport en réduisant les temps de parcours et les congestions, et (iii) l'amélioration du confort de l'utilisateur en lui fournissant une multitude de services d'information, d'aide à la décision, de guidage et d'accès à Internet. Tout ceci aurait également comme débouché l'intégration des transports dans une politique de développement durable, notamment en réduisant les émissions de gaz pour les véhicules légers ou poids lourds et en optimisant la maintenance de l'infrastructure.

Une des principales composantes de ces systèmes ITS est la communication inter-véhicules. En effet, les communications impliquant des véhicules joueront un rôle important dans les années à venir, que ce soit afin de communiquer entre véhicules ou encore avec les infrastructures existantes. Les voitures de demain ne se contenteront plus de détecter les dangers grâce à des radars ou des caméras installés sur les routes, elles seront capables de recevoir des messages d'alerte envoyés par les autres usagers ou par l'infrastructure (panneaux, portiques, etc.) et de transmettre ces informations à d'autres véhicules. Les voitures seront dotées d'une batterie de capteurs divers (VSN, *Vehicular Sensor Networks*). Chacune collectera des données et alimentera le réseau formé par les véhicules alentour dans un rayon de quelques kilomètres.

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

1.2 Contributions de cette thèse

Les propriétés des réseaux de véhicules doivent donc lever des verrous technologiques importants tels l'accès au canal, le routage et la dissémination des données, l'auto-organisation, l'adressage ou encore la sécurité. Dans cette thèse, on s'attaque à un de ces verrous technologiques à savoir le routage et la dissémination des informations dans ce type de réseaux. Notre objectif est de proposer des solutions de routage ad hoc et de dissémination géo-localisée adaptées aux environnements urbains.

Notre démarche consiste à prendre en considération un paramètre clé du fonctionnement du réseau ad hoc de véhicules, à savoir la densité du réseau. Dans ce contexte, la première contribution de cette thèse est de proposer une nouvelle technique d'estimation de la densité de véhicules dans un tronçon de route situé entre deux intersections. Le but principal de cette technique est de caractériser d'une manière fine la densité du trafic d'un tronçon, en fournissant une distribution spatiale des véhicules mobiles sur la voie de circulation.

Le second problème auquel nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette thèse, est celui du routage multi-sauts dans la partie ad hoc du réseau de véhicules. De nombreux travaux ont été menés pour garantir l'acheminement des messages dans les réseaux mobiles ad hoc. Cependant, ces protocoles de routage sont très dépendants de la connectivité entre les nœuds, or celle-ci est disparate dans les réseaux de véhicules. La seconde contribution de cette thèse est de

proposer un protocole de routage qui intègre le mécanisme d'estimation du trafic routier afin de sélectionner des routes robustes ayant une connectivité élevée.

Enfin, nous nous sommes intéressés à la dissémination géo-localisée des données. En effet, plusieurs applications au sein des VANETs motivent ce mode de communication (applications de sécurité routière, station d'informations, services d'aide à la conduite, etc...). Dans ce contexte, la troisième contribution de cette thèse consiste en la proposition d'un mécanisme distribué qui permet d'émuler le fonctionnement d'une infrastructure classique, destinée à diffuser localement (au niveau d'une intersection) des paquets de données d'une manière périodique.

1.3 Organisation de la thèse

Cette thèse traite de la communication dans les réseaux de véhicules. Elle est organisée comme suit :

Dans le chapitre 2, nous introduisons le concept de réseaux de véhicules. Nous décrivons les architectures de communication et les technologies de communication sans fil potentielles pour ce type de réseaux. Nous décrivons aussi les caractéristiques et les applications diverses des réseaux véhiculaires. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les principaux acteurs du domaine ainsi qu'un panorama de projets et de travaux de standardisation.

Notre approche d'estimation du trafic routier dans un environnement urbain (*IFTIS*, *Infrastructure Free Traffic Information System*) est exposée dans le chapitre 3. Après une présentation des systèmes de gestion de trafic existants et leurs inconvénients, nous décrivons la solution proposée afin d'estimer d'une manière distribuée la densité d'un tronçon de route entre deux intersections. Les résultats des simulations, réalisées sous différents scénarios de trafic à l'aide de l'outil de simulation QualNet et d'un modèle de mobilité réaliste, sont présentés. L'objectif de ces simulations est d'étudier les performances du mécanisme proposé en termes de précision dans l'estimation de la densité du trafic routier et de délai/durée de remontée de l'information.

Le chapitre 4 s'intéresse à la problématique du routage. Si ce domaine a été et est encore très actif, peu de protocoles de routage ont été spécifiquement conçus et optimisés pour les réseaux de véhicules. Afin de répondre aux spécificités des réseaux de véhicules, des mécanismes et des protocoles spécifiques doivent donc être utilisés. Ce chapitre décrit notre nouveau protocole de routage géographique (*GyTAR*, *improved Greedy Traffic Aware Routing*) qui tire partie des

caractéristiques des voies urbaines et de l'estimation du trafic routier (en utilisant IFTIS) pour le routage des paquets. La solution proposée est évaluée en termes de taux de délivrance, délai de bout en bout et surcharge du routage et comparée, sous diverses conditions, à d'autres protocoles de routage de référence.

Dans le chapitre 5, nous allons d'abord montrer l'intérêt de disposer d'une infrastructure pour la dissémination d'informations dans les réseaux de véhicules. Ensuite, nous allons proposer un nouveau mécanisme (GVI, *Geo-localized Virtual Infrastructure*) qui permet d'émuler le fonctionnement d'une infrastructure classique destinée à diffuser localement (au niveau d'une intersection) des paquets de données de manière périodique. Différents aspects de l'approche sont évalués analytiquement alors que ses performances (pourcentage de véhicules non informés et le nombre moyen de copies d'un message reçu par véhicule) sont évaluées par simulation à l'aide de l'outil QNAP.

Pour finir, une synthèse générale qui reprend l'ensemble des contributions importantes de ce travail de recherche est présentée. De plus, un ensemble de perspectives sont identifiées et discutées.

Chapitre 2

RESEAUX DE VEHICULES : DIFFERENTES APPROCHES, CARACTERISTIQUES ET VERROUS

2.1 Introduction

Les communications impliquant un véhicule joueront un rôle important dans les années à venir, que ce soit afin de communiquer avec un autre véhicule ou encore avec les infrastructures existantes. En effet, les voitures de demain ne se contenteront plus de détecter les dangers grâce à des radars ou des caméras, elles seront capables de recevoir des messages d'alerte envoyés par les autres automobilistes ou par l'infrastructure (panneaux, portiques, etc...) et de transmettre ces informations à d'autres véhicules. Tel est en tout cas l'ambition des réseaux de véhicules que les chercheurs américains, japonais et européens veulent mettre en place.

Ces réseaux véhiculaires sont passés du stade de simple curiosité pour revêtir aujourd'hui un intérêt certain aussi bien du point de vue de l'industrie automobile que des opérateurs de réseaux et services et de la communauté de recherche. Ces réseaux véhiculaires sont en effet une classe émergente de réseaux sans fil permettant des échanges de données entre véhicules ou encore entre véhicules et infrastructure. Ils ont été amplement étudiés en Europe, au Japon et en Amérique du Nord dans le but de fournir de nouvelles technologies capables d'améliorer la sécurité et l'efficacité des transports routiers.

Le reste du chapitre est organisé comme suit : dans la section 2, nous présentons une description détaillée des architectures et des services et applications diverses des communications véhiculaires ainsi que les technologies de communication sans fil potentielles pour ce type de réseaux. Outre une présentation des principaux acteurs impliqués dans les réseaux de véhicules, la section 3 présente quelques projets et travaux de standardisation récents associés à ces réseaux. Dans la section 4, nous présentons une description détaillée des caractéristiques et des challenges liés aux réseaux de véhicules. La section 5 introduit les objectifs et les motivations de nos travaux.

2.2 Réseaux de véhicules : définition de la technologie

Après avoir présenté les services et les applications des réseaux de véhicules, cette section décrit les architectures de communications possibles ainsi que les technologies de communication sans fil potentielles pour ce type de réseaux.

2.2.1 Services et applications des réseaux de véhicules

Les réseaux véhiculaires recourent deux grandes classes d'applications [1], [2] à savoir les applications permettant de bâtir un système de transport intelligent ITS (*Intelligent Transport System*) et celles liées au confort ou au divertissement du conducteur et des éventuels passagers.

Les applications liées à la sécurité routière (applications ITS) représentent une part importante des applications des réseaux véhiculaires. Ces applications comprennent la diffusion des messages rendant compte de l'état du trafic, de la météo, de l'état de la chaussée, des accidents, des travaux ou encore des messages rappelant les limitations de vitesse ou les distances de sécurité. Les applications ITS comprennent aussi les systèmes d'aide à la conduite et les véhicules coopératifs : aide aux dépassements de véhicules, prévention des sorties de voies en ligne ou en virage, etc...

Les exemples de services ne se limitent pas seulement aux applications de sécurité routière mais à d'autres types d'applications notamment la diffusion d'informations pratiques par des fournisseurs de services aux automobilistes (spot d'information, offre de services utiles aux conducteurs : station service ou présentation de places de stationnement disponibles, connexion à l'Internet, aide à la communication entre véhicules qui se suivent, etc...). Ces applications offrent des perspectives intéressantes pour les opérateurs de télécommunications qui cherchent de nouvelles niches de services.

Au regard de ces potentialités, les réseaux véhiculaires représentent un nouveau marché porteur et prometteur en termes de déploiement d'infrastructures réseau et de fourniture des services associés.

2.2.2 Architectures de réseaux de véhicules

Dans ces réseaux de véhicules, les services proposés permettent de distinguer plusieurs communications possibles (cf figure 2.1) :

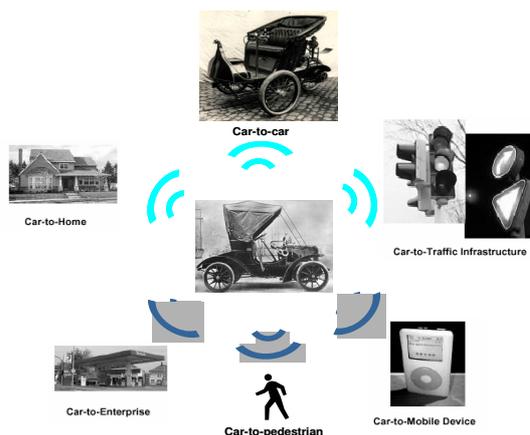


Figure 2.1 : Types de communication dans un réseau de véhicules.

Les réseaux véhiculaires peuvent donc être déployés par des opérateurs de réseaux et/ou de services suivant les configurations ou la combinaison des configurations suivantes :

2.2.2.1 Communications de Véhicule à Véhicule (V2V)

Dans cette approche, un réseau de véhicules est vu comme un cas particulier de réseaux mobiles ad hoc MANET (*Mobile Ad hoc Network*) où les contraintes d'énergie, de mémoire et de capacité de calcul sont relaxées, et où le modèle de mobilité n'est pas aléatoire, mais prévisible (sous-couche du réseau routier) avec une très forte mobilité. Cette architecture peut être utilisée dans les scénarios de diffusion d'alerte (freinage d'urgence, collision, ralentissement, etc...) ou pour la conduite coopérative. En effet, dans le cadre de ces applications de sécurité routière, les réseaux à infrastructure montrent leurs limites, surtout en termes de délais. Et il est clair qu'une communication ad hoc multi-sauts est plus performante qu'une communication passant par un réseau d'opérateur.

2.2.2.2 Communications de Véhicule à Infrastructure (V2I)

Nous ne nous concentrons donc pas seulement sur des simples systèmes de communications inter véhicules, mais prenons aussi en compte des applications qui utilisent des points d'infrastructure RSU¹ (*Road Side Units*). Ceux-ci démultiplient les services grâce à des portails Internet communs. Des services à base d'infrastructure (accès à Internet, échange de données de voiture-à-domestique, communications de voiture-à-garage pour le diagnostic distant, etc...) profitent aux clients et peuvent motiver des conducteurs à investir dans l'équipement sans fil supplémentaire pour leurs véhicules.

¹ Dénomination proposée par le consortium C2C-CC.

2.2.2.3 Communications hybrides

La combinaison de ces deux types de communications permet d'obtenir une communication hybride très intéressante. En effet, les portées des infrastructures étant limitées, l'utilisation de véhicules comme relais permet d'étendre cette distance. Dans un but économique et en évitant de multiplier les bornes à chaque coin de rue, l'utilisation de sauts par véhicules intermédiaires prend toute son importance.

Un cas particulier de l'architecture hybride est les réseaux VSN (*Vehicular Sensor Networks*). En effet, les VSN émergent en tant que nouvelle architecture de réseaux de véhicules, qui a pour objectif la collecte et la diffusion proactive et en temps réel des données relatives à l'environnement dans lequel évoluent les véhicules, plus particulièrement en zones urbaines. En effet, les voitures sont munies de plus en plus de capteurs de toutes catégories (caméras, capteurs de pollution, capteurs de pluies, capteurs de l'état des pneumatiques, GPS, etc...). Ceux-ci peuvent être utiles pour l'obtention d'informations sur le trafic routier (embouteillages, ralentissements, vitesse moyenne du trafic, etc...), ou sur les places de parking disponibles ou même pour des informations plus générales telles que la consommation moyenne de carburant et le taux de pollution ou encore pour des applications de surveillance, via les caméras embarquées sur des voitures.

2.2.3 Technologies de communication sans fil potentielles pour les réseaux de véhicules

Les réseaux sans fil peuvent potentiellement apporter une solution pour le déploiement de réseaux de véhicules. Il convient donc de faire un état de l'art de ces technologies et des différents moyens de les mettre en œuvre.

Dans un premier temps, nous nous attachons donc à présenter les différentes solutions radio existantes avec leurs caractéristiques. Ensuite, dans un deuxième temps, nous explicitons un choix possible de technologie de communication pour les réseaux de véhicules.

2.2.3.1 Les solutions radio existantes

Il existe de nombreuses solutions pour échanger de l'information par liaison radio et, classiquement dans la littérature [3] [4], les différentes techniques sont classées suivant leur débit et leur portée.

2.2.3.1.1 WPAN (Wireless Personal Area Network)

Les réseaux sans fil personnels ou WPAN sont des réseaux sans fil à très faible portée (de l'ordre d'une dizaine de mètres). Ils sont le plus souvent utilisés dans le cadre de l'informatique vestimentaire (ou *Wearable Computing*) qui consiste à faire communiquer entre eux des matériels présents sur une personne (par exemple une oreillette et un téléphone portable). Ils sont également utilisés pour relier des équipements informatiques entre eux : par exemple pour relier une imprimante ou un assistant personnel PDA (*Personal Digital Assistant*) à un ordinateur de bureau.

Pour mettre en œuvre de tels réseaux, la principale technologie est IEEE 802.15.1 [5] ou Bluetooth. Elle fut proposée par Ericsson en 1994 et fournit un taux de transmission radio théorique de 1 Mbit/s pour une portée maximale d'une trentaine de mètres.

2.2.3.1.2 WLAN (Wireless Local Area Network)

Les réseaux locaux sans fil ou WLAN sont généralement utilisés à l'intérieur d'entreprises, d'universités mais également chez les particuliers depuis le développement des offres à haut débit.

Ils font le pont entre la téléphonie et l'informatique et possèdent de nombreux avantages :

- ils permettent de rendre mobiles les équipements informatiques ;
- ils autorisent des débits compatibles avec les applications informatiques actuelles ;
- ils utilisent des bandes de fréquences libres de droit d'utilisation ;
- ils ne nécessitent que peu ou pas d'infrastructure ;
- ils ont une mise en œuvre aisée.

Il faut malgré tout pondérer tous ces avantages par le fait que les communications radio sont moins fiables que les filaires à cause des interférences radio, des problèmes de multi-trajets des ondes, des irrégularités électromagnétiques, etc... De plus, les WLANs sont moins sûrs que les réseaux filaires : le médium pour faire transiter l'information étant l'air, celui-ci est ouvert à d'éventuels intrus.

Ces réseaux sont principalement basés sur la technologie IEEE 802.11 [6] soutenue par le WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*) ou sur la technologie HiperLan 1 et son remplaçant Hiperlan 2 soutenue par l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Ils offrent des taux de transmission radio théoriques pouvant atteindre 54 Mbit/s pour IEEE 802.11g ou HiperLan 2 c'est-à-dire bien plus élevés que la technologie Bluetooth. La portée de ces technologies est également beaucoup plus importante : de l'ordre de 300 mètres en extérieur et 100 mètres à l'intérieur de bâtiments pour IEEE 802.11b et d'une centaine de mètres pour Hiperlan 2.

2.2.3.1.3 WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*)

Les réseaux métropolitains sans fil ou WMAN, également appelés boucle locale radio (*BLR*), étaient à l'origine prévus pour interconnecter des zones géographiques difficiles d'accès à l'aide d'un réseau sans fil. Actuellement ces réseaux sont utilisés dans certaines villes américaines (San Francisco) pour fournir un accès Internet aux habitants. Les réseaux basés sur la technologie IEEE 802.16 ont une portée de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres (50 kms de portée théorique annoncée) et un taux de transmission radio théorique pouvant atteindre 74 Mbit/s pour IEEE 802.16-2004 [7] plus connue sous le nom commercial de WiMAX.

C'est également dans cette catégorie que peuvent être classés les réseaux téléphoniques de troisième génération utilisant la norme UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) pour transmettre de la voix et des données. Cette norme UMTS propose des taux de transmission radio théoriques pouvant aller jusqu'à 2 Mbit/s sur des distances de plusieurs kilomètres.

2.2.3.1.4 WWAN (*Wireless Wide Area Network*)

Les réseaux sans fil étendus ou WWAN regroupent notamment les différents réseaux cellulaires de première et deuxième génération mais également les réseaux satellitaires. Les réseaux cellulaires téléphoniques reposent sur des technologies comme GSM (*Global System for Mobile Communication*) et GPRS (*General Packet Radio Service*). Les réseaux satellites s'appuient quant à eux sur les normes comme DVB-S (*Digital Video Broadcasting-Satellite*) pour transmettre l'information et proposent des débits élevés (de l'ordre de 40 Mbit/s pour la norme DVB-S).

Synthèse

La figure 2.2 présente les différentes catégories de réseaux sans fil décrits ci-dessus :

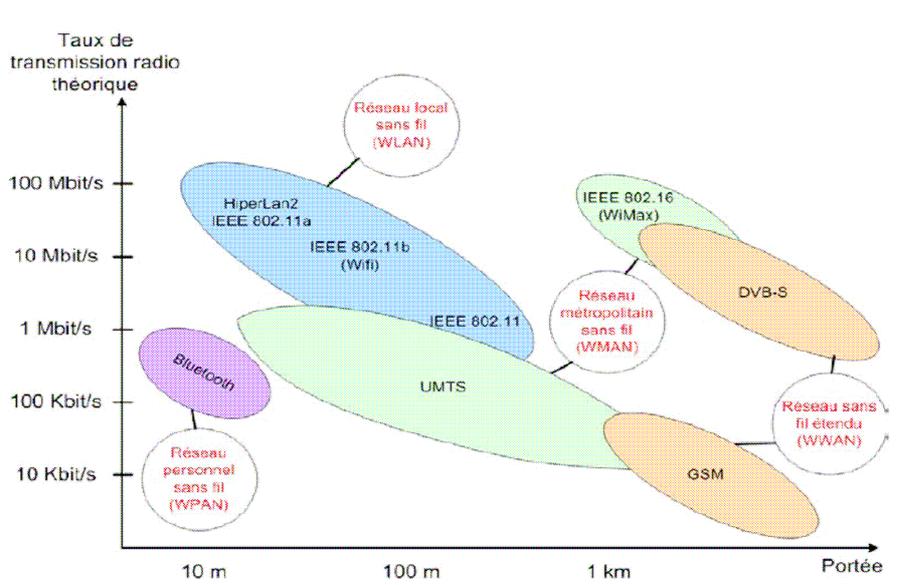


Figure 2.2 : Les différentes catégories de réseaux sans fil [3].

Aucune solution de communication ne peut satisfaire à la fois les besoins des applications IVC en termes de délai, portée, bande passante et la contrainte de souplesse dans le déploiement du réseau à grande échelle. En effet, les réseaux cellulaires ne sont pas adaptés aux IVC pour plusieurs raisons : (i) les communications via une infrastructure fixe peuvent présenter des délais importants inacceptables pour les messages de sécurité, (ii) les capacités pour satisfaire les besoins prévus par les applications ITS peuvent être limitées et (iii) les applications IVC peuvent nécessiter des transmissions fréquentes de courtes durées qui seraient extrêmement coûteuses. L'option des réseaux WPAN est à écarter à cause de leur très faible portée. Les technologies de type WMAN offrent une grande portée et un débit assez important. Cependant, ces technologies nécessitent une infrastructure importante et l'intervention d'opérateurs comme dans le cas des solutions cellulaires (investissement coûteux) et ne sont donc pas facilement déployables à court terme.

La solution des réseaux WLAN semble être la plus adaptée, non seulement pour la portée et la bande passante, mais surtout pour la facilité de déploiement. En effet, cette technologie est en pleine expansion et elle est en train de prendre une place particulièrement importante. Elle est d'autant plus attrayante, qu'elle peut être déployée immédiatement.

Il convient donc de considérer, dans le cadre des communications inter-véhicules, des techniques de type WLAN mais en gardant à l'esprit qu'il faut malgré tout analyser leur

coexistence avec les réseaux WMAN (WiMAX) à long terme, une fois que ces derniers seront déployés.

Dans la suite de cette partie, nous nous intéresserons au standard IEEE 802.11 (le standard qui domine le domaine des WLAN) et son adéquation aux réseaux de véhicules.

2.2.3.2 Utilisation de la norme 802.11 pour les communications inter-véhicules

La norme IEEE 802.11 [6] est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN). La norme IEEE 802.11 est en réalité la norme initiale offrant des débits de 1 ou 2 Mbps. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit (c'est le cas des normes 802.11a, 802.11b, 802.11g et 802.11p, appelées normes 802.11 physiques) ou bien préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité ou une meilleure interopérabilité.

Par rapport au modèle OSI, le IEEE 802.11 ne concerne qu'une partie de la couche de liaison de données 2 et la couche physique 1 et reste donc entièrement compatible avec les couches supérieures.

Dans le but de valider le choix de la norme IEEE 802.11, nous avons procédé à de nombreux tests en condition réelle dans des véhicules. Lors de ces expérimentations, nous avons utilisé des véhicules équipés d'un kit composé d'un PC portable, d'un récepteur GPS, d'une carte IEEE 802.11b et d'une antenne externe. Cette plateforme de tests nous a permis d'effectuer des tests mettant en place des réseaux allant de deux à six véhicules. Ces expériences nous ont permis d'évaluer les performances de la norme ainsi que de comprendre les problèmes qui surviennent lors de la communication inter véhicules.

Les premiers résultats obtenus lors de ces tests sont encourageants. En particulier, ils montrent la bonne performance de la norme 802.11 avec des pertes ou des délais relativement faibles. Nous avons également constaté que la distance est un facteur de perte alors que la vitesse et l'accélération ne sont que peu influentes sur la communication. Les résultats expérimentaux ont révélé aussi la faisabilité du réseau ad hoc pour étendre la zone de couverture des points d'accès.

Pour plus de détails sur la plateforme, les tests, les résultats et leurs interprétations, on peut se référer à l'annexe I.

2.3 Réseaux de véhicules : acteurs, projets et standardisation

2.3.1 Principaux acteurs dans le domaine des VANETs

Les nombreuses applications qu'introduisent les réseaux de véhicules ont suscité l'intérêt de plusieurs entités. Que ce soit des organisations gouvernementales ou de standardisation, des entreprises ou des centres de recherche. Dans le monde entier et comme le montre la figure 2.3, il existe beaucoup de projets nationaux/internationaux qui leurs sont dédiés. Nous pouvons citer le consortium VSC (*Vehicle Safety Consortium*, US) [8], CAMP (*Collision Avoidance metrics Partnership*, US) [9], C2C-CC (*Car-2-Car Communication Consortium*, Europe) [10], ASV Program (*Advanced Safety Vehicle*, Japon) [11], beaucoup d'efforts de standardisation comme nous le verrons plus bas et des expérimentations réelles telles que faites par le programme VII (*Vehicle Infrastructure Integration*, US) [12].

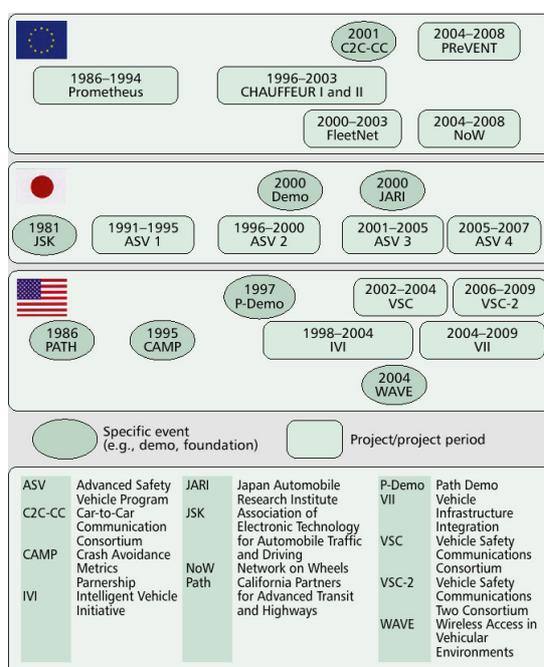


Figure 2.3 : Dynamique autour des réseaux de véhicules [13].

2.3.1.1 Les organisations gouvernementales

L'intérêt majeur qu'ont les gouvernements envers les VANETs réside dans leur capacité à apporter plus de sécurité sur les routes. Certains ont même dédié une bande de fréquence spécifique aux communications inter-véhicules et véhicules à stations, tels que DSRC aux Etats-Unis et au Japon et dernièrement aussi en Europe qui respectivement utilise la bande de fréquence de 5.9 GHz et 5.8 GHz. On peut aussi citer le département des transports Américain USDOT (*US Department of Transportation*) qui a entrepris le projet VSC (*Vehicle Safety Communications*) [8] dont l'objectif est d'évaluer des applications de sécurité routière apportées par

les VANETs. Il a permis de : (i) déterminer les configurations (matériel et logiciel) nécessaires pour chaque type d'application et (ii) participer au développement de DSRC (*Dedicated Short Range Communication*)² en faisant en sorte qu'il comprenne les critères de sécurité nécessaires.

Le Forum FEHRL (*Forum of European National Highway Research Laboratories*) [14] par exemple réunit plusieurs groupes qui travaillent sur les VANETs et l'aspect sécurité qu'il pourrait apporter aux routes européennes. Le but de ce forum fondé en 1999 est d'encourager la recherche collective entre instituts et laboratoires européens et mettre des connaissances et des conseils à la disposition de la commission européenne, des gestionnaires routiers, des entrepreneurs et des usagers.

2.3.1.2 Les industriels

2.3.1.2.1 Les consortiums

Il existe plusieurs consortiums qui travaillent activement au développement de la technologie des réseaux de véhicules, ces groupes sont généralement composés de constructeurs automobiles, de laboratoires de recherche et développement ainsi que d'autres entreprises (informatique, électronique, etc...)

Le Car2Car Communication Consortium [10] par exemple représente une organisation à but non lucratif, fondée par les constructeurs automobiles européens (BMW, Audi, Daimler Benz, Fiat, Honda, Opel, Renault, Volkswagen) ouverte aux laboratoires de recherche (INRIA, Université de Düsseldorf, de Munich, etc...) et aux partenaires commerciaux qui a pour but l'amélioration de la sécurité ainsi qu'une meilleure gestion du trafic routier.

L'initiative VII (*Vehicle Infrastructure Integration*) [12] représente aussi un consortium, entre le gouvernement américain, les constructeurs automobiles (BMW, Chrysler, Daimler Benz, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Nissan, Subaru, Suzuki, Toyota, Volkswagen). Le consortium a été lancé en 2003 par USDOT (*US Department of Transportation*) et il a pour objectif d'étudier les possibilités offertes par les systèmes de communications bilatérales, de véhicule à véhicule, et de véhicule à infrastructure routière pour fournir une nouvelle gamme de services aux conducteurs automobiles, de camions et d'autobus. Les premières expérimentations faites à Détroit aux US ont démontré la faisabilité de la technologie [16]. L'achèvement du projet étant prévu à l'horizon 2017.

² Voir la section standardisation.

Au Japon, qui est le pionnier dans le domaine, il y a eu de grandes initiatives telles que VICS (*Vehicle Information and Communication System*), AHS (*Advanced Cruise-Assist Highway System*, depuis 1996), DSSS (*Driving Safety Support Systems*, depuis 2002) and ASV (*Advanced Safety Vehicle*, depuis 1991). Dans le programme du projet ITS-Safety 2010, des expérimentations à grande échelle sur les voies publiques sont prévues en 2008 et un déploiement dans tout le pays en 2010. Le Japon a aussi mis en place un système à satellites Quasi-Zenith [17] par le biais d'un partenariat public-privé «afin d'améliorer les différents types de services de localisation». L'un des principaux objectifs est de réduire les coûts sociaux des accidents de la route. Le système QZSS devrait permettre de radiodiffuser des informations extrêmement précises sur le positionnement des véhicules et d'améliorer ainsi la sûreté et la sécurité routière.

2.3.1.2.2 Les industriels du logiciel

Beaucoup d'entreprises investissent dans le domaine des systèmes de transport intelligents, en particulier dans la partie guidage et informations en temps réel. Des sociétés comme Dash, Google et TomTom ne font plus uniquement que cartographier les routes, ils permettent aussi aux conducteurs (ou passagers) de recevoir des informations en temps réel sur l'état du trafic routier, de se connecter à Internet, de connaître les enseignes (restaurants, librairie, parking, cinémas, etc...) sur le chemin.

Microsoft par exemple propose aux constructeurs automobiles des versions de son système d'exploitation [18] qui servent de plateforme standardisée et qui permettent de gérer toute l'électronique embarquée, les communications et offre aux passagers diverses applications (divertissement, services, etc...).

2.3.1.2.3 Les télécoms

Les opérateurs télécom forts de leurs infrastructures déjà largement déployées, accordent une attention particulière au développement des VANETs, Orange Labs, SFR, Telcom Italia, AT&T labs ou encore Deutsche Telekom participent tous au développement de la technologie via des partenariats avec des industriels, des universités et leurs propres équipes de recherche et développement. L'opérateur le plus impliqué à notre connaissance est Deutsche Telekom qui est à l'origine de plusieurs initiatives en Allemagne. Il y a aussi SFR qui exporte des données brutes issues de sondes de mesure déployées dans les réseaux mobiles 2G/2G+/3G pour les mettre à disposition de partenaires tels que Tomtom pour des applications d'info trafic.

L'intérêt pour l'opérateur ou fournisseur de services réside dans l'exploitation de ses réseaux afin de fournir des services tels que de la publicité, l'information sur le trafic, etc... En fait, de tels réseaux correspondent à une évolution/extension naturelle de son propre réseau. Ils représentent une solution peu coûteuse qui améliore les performances de son réseau en utilisant le multi-sauts.

2.3.1.3 Les universités et centres de recherche

Etant une technologie toujours en développement, les réseaux de véhicules font partie des grandes tendances en termes de recherche. Le nombre de conférences et de workshop organisés spécialement pour les VANETs en est la preuve. Les centres de recherche et universités (UCLA, Université de Karlsruhe, Université de Stanford, INRETS, etc...) participent activement à l'amélioration et à l'optimisation de plusieurs points, parmi lesquels : les architectures de communication, le routage et la dissémination des données, les mediums de communication (couche MAC et physique), la sécurité des communications, l'auto-organisation, la tolérance aux pannes, etc...

Par exemple, les ingénieurs du Laboratoire Vehicularlab de l'université de l'UCLA [19] travaillent à construire un réseau réel de véhicules. Voici leur point de vue : à l'heure où nos voitures embarquent de plus en plus de technologie et ont de plus en plus besoin de communiquer avec l'extérieur - et demain avec le monde des objets communicants qui nous cernera -, les chercheurs estiment qu'il serait assez économique d'ajouter des capteurs dans les toits et les pare-chocs des véhicules pour créer des plateformes de réseaux mobile ad-hoc, capables de relier en réseau les automobiles passant à proximité les unes des autres. Les premiers prototypes se destinent bien sûr aux véhicules d'urgence, mais des tests sont en préparation sur une cinquantaine de véhicules appartenant à la flotte de l'université (*Campus Vehicular Testbed, CVeT*).

2.3.2 Les projets en cours

Beaucoup d'activités de recherche, de développement et de standardisation portant sur les communications inter véhicules sont actuellement en cours. En Europe et dans le monde entier, des projets R&D majeurs ont été amorcés pour constituer la base d'un système de transport intelligent Européen. Ci-dessous sont décrits quelques projets majeurs traitant des communications véhiculaires :

PREVENT : le projet intégré européen PREVENT [20] vise à élaborer des applications relatives à la sécurité routière en utilisant des dispositifs avancés de détection et de communication

intégrés dans les systèmes embarqués d'aide à la conduite. Ces systèmes analysent la nature et l'importance de tout danger potentiel, tout en tenant compte de la situation du conducteur.

SafeSpot : le projet européen SafeSpot [21] a pour objectif principal l'amélioration de la sécurité routière. Des études ont montré que le conducteur est, à 90%, responsable des accidents, principalement pour des causes d'inattention ou des erreurs de jugement. Aussi, le projet SafeSpot propose de développer un ensemble d'assistance fournissant au conducteur une indication de sa marge de sécurité. Ceci est effectué suffisamment à l'avance à l'approche d'une difficulté.

Watch-Over : le but de WATCH-OVER [22] est de concevoir et de développer un système coopératif pour la prévention des accidents dans les zones accidentogènes. Le concept innovant est représenté par une plateforme embarquée et un module utilisateur. Le système repose sur la communication faible distance et les capteurs de vision.

CVIS : le projet CVIS (*Cooperative. Vehicle-Infrastructure Systems*) [23] vise à concevoir, mettre en œuvre et tester les nouvelles technologies nécessaires pour permettre aux véhicules de communiquer entre eux ainsi qu'avec les infrastructures routières situées à proximité. Il a pour ambition d'amorcer une révolution dans la mobilité des voyageurs et des marchandises en concevant de toutes nouvelles modalités d'interaction entre les conducteurs, leurs véhicules, les marchandises qu'ils transportent et les infrastructures routières. Ainsi, le projet CVIS vise à améliorer la sécurité et l'efficacité du transport routier et à réduire son impact sur l'environnement.

GST : le projet GST (*Global System for Telematics*) [24] a pour objectif général de créer un environnement dans lequel des services de télématique automobile innovants peuvent être créés et fournis de manière rentable. Il devrait permettre d'élargir l'éventail des services de télématique économiques qui sont à disposition des constructeurs et des consommateurs.

DRiVE : le projet DRiVE (*Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments*) [25] vise à travailler sur la convergence entre différentes technologies cellulaires et de réseaux hauts débit (GSM, UMTS, DAB et DVB-T) afin de mettre en place le substrat nécessaire au développement de services IP innovants à destination des véhicules.

NoW : le projet NoW (*Network-on-Wheels*) [26], le successeur du projet Fleetnet [27], travaille sur la mise en œuvre de protocoles de communications et d'algorithmes de sécurité des données dans

les réseaux de véhicules. En se basant sur la technologie sans fil IEEE 802.11 et un routage fondé sur la position dans un contexte de communication véhicule à véhicule ou véhicule à infrastructure, le but est d'implanter un système de communication de référence et de contribuer à la standardisation d'une telle solution en Europe.

SeVeCom : le projet SeVeCom (*Secure Vehicular Communication*) [28] s'intéresse à la sécurité des futurs réseaux de véhicules, incluant la sécurité et l'anonymat de la communication véhicule à véhicule et véhicule à infrastructure.

2.3.3 Travaux de standardization et de normalization

2.3.3.1 DSRC et IEEE 802.11p

Pour communiquer de véhicule à véhicule au sein d'un peloton, l'ASTM (*American Society for Testing and Materials*) a adopté en 2002 une norme sans-fil appelée DSRC (*Dedicated Short Range Communication*) [29]. En 2003, le groupe de travail IEEE a repris ces travaux pour définir un nouveau standard dédié aux communications inter -véhicules, nommé WAVE (*Wireless Ability in Vehicular Environments*) et aussi connu sous le nom de IEEE 802.11p [30] (voir annexe II pour plus de détails). Cette norme utilise le concept de multi-canaux afin d'assurer les communications pour les applications de sécurité et les autres services du Transport Intelligent. En Europe, l'obstacle principal pour l'introduction des VANETs pour la sécurité routière était le manque d'un spectre de fréquences dédié. Comparé aux Etats-Unis et au Japon, le procédé pour l'attribution de fréquence est complexe et prend beaucoup de temps puisque tous les pays Européens et leurs autorités nationales sont impliqués. Aujourd'hui, des mesures principales ont été prises et une décision de la Commission Européenne pour désigner le spectre est prévu cette année (2008) et sera bientôt mise en application par les pays de l'UE [15].

DSRC œuvre dans la bande de fréquence des 5.9GHz (Europe et Etats-Unis) ou 5.8GHz (Japon). Cette bande de fréquence est définie en Europe et aux Etats-Unis respectivement par l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) et le FCC (*Federal Communication Commission*). Elle est généralement segmentée en 7 canaux de 10 MHz chacun, l'ensemble des canaux se répartissant fonctionnellement en 1 canal de contrôle et 6 canaux de service. Le canal de contrôle est réservé à la transmission des messages de gestion du réseau et des messages de très haute priorité à l'instar des certains messages critiques liés à la sécurité routière. Les 6 autres canaux sont quant à eux dédiés à la transmission des données des différents services annoncés sur le canal de contrôle.

Plus largement, DSRC regroupe une série de standards et protocoles dédiés aux communications véhiculaires. Certains de ces standards et protocoles sont en cours de définition aux Etats-Unis, notamment au sein de l'IEEE. Ainsi, DSRC se base sur une couche physique et une couche MAC définies dans le standard IEEE 802.11p (WAVE). Cette couche physique est dérivée de l'IEEE 802.11a. Elle est capable d'offrir un débit entre 6 et 27 Mbps (pour des distances jusqu'à 1000 mètres) avec une modulation de type OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). De même, la couche MAC du 802.11p reprend le principe du CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) développé dans le protocole MAC de l'IEEE 802.11, avec un complément apportant la gestion de la qualité de service et le support du protocole de marquage de priorité. En effet, la couche MAC du WAVE est gérée en utilisant des priorités d'accès comme la norme IEEE 802.11e. Ainsi, la fenêtre de contention est calculée selon les quatre priorités disponibles.

Le reste de la pile protocolaire de DSRC se situant entre la couche liaison et la couche application est en cours de standardisation par le groupe de travail IEEE 1609 [31]. Par conséquent, IEEE 1609 est un standard pour les couches hautes sur lequel IEEE 802.11p se base. La famille des standards IEEE 1609 pour WAVE, se décompose en quatre standards : pour la gestion des ressources (*IEEE 1609.1 - WAVE Resource Manager*), pour la sécurisation des messages (*IEEE 1609.2 - WAVE Security Services for Applications and Management Messages*), pour les services de niveau réseau et transport incluant l'adressage, le routage (*IEEE 1609.3 - WAVE Networking Services*), et pour la coordination et la gestion des 7 canaux DSRC (*IEEE 1609.4 - WAVE Multi-Channel Operation*).

2.3.3.2 ISO : TC204/WG16 - CALM

Au niveau mondial, l'ISO TC204/WG16, a produit une série de drafts ITS relatifs à l'interface radioélectrique nécessaire en courte ou en longue portées connus sous le nom de CALM (*Continuous Air-interface, Long and Medium Range*) [32]. L'objectif de CALM est de développer une plateforme logicielle embarquée dans les véhicules qui assurera l'interface entre plusieurs technologies de communication 2G, 3G, 5 GHz DSRC, 60 GHz, MWB (802.16e, 802.20 et HC-SDMA) et le handover entre ces technologies permettant ainsi une mobilité sans couture. Par exemple, c'est elle qui choisira automatiquement de passer par du wifi, du GSM ou du DSRC en fonction de la disponibilité des réseaux et du message à transmettre. CALM pourra inclure aussi de nouvelles technologies de communication. Ainsi les applications ciblées vont de la sécurité routière aux applications commerciales, vue la multitude des technologies considérées.

Le concept CALM que l'ETSI aide à développer également, est maintenant au centre de plusieurs projets Européen tels que les projets cités plus haut (CVIS et Safespot) qui testent les solutions CALM. Aux Etats-Unis, l'initiative VII utilise les standards IEEE 802.11p/1609 à 5.9 GHz prévus être alignés avec les standards 5.9GHz de CALM, bien que les standards IEEE n'intègrent pas le handover vertical entre les différentes technologies d'accès.

2.3.3.3 ETSI : TC ITS

Au niveau Européen, l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) a récemment créé un comité technique TC ITS dans le but de développer des standards et spécifications pour les ITS. TC ITS est organisé en 5 groupes de travail : WG1 - User & Application requirements, WG2 - Architecture and cross layer issues, WG3 - Transport and Network, WG4 - Media and related issues, et le WG5 - Security. Dans le WG3 par exemple, ils s'intéressent à un adressage et un routage géographiques.

Le comité a mis en place un plan de route pour les prochaines années dans le but de produire un ensemble de standards allant de l'architecture de communication à la spécification de protocoles avec un ensemble de tests. Le groupe de travail ETSI ERM TG37 est à la tête de ce comité. ERM TG37 coopère aussi avec d'autres comités ETSI mais aussi avec les autres organismes de normalisation et notamment ISO TC204 (CALM). En effet, il contribue au développement des standards du groupe ISO TC204 et suppose aussi l'hétérogénéité d'accès.

2.3.3.4 Le consortium Car-to-Car (C2C-CC)

Le consortium de communication Car2Car [10] a été lancé par six constructeurs automobiles européens et ouvert aux fournisseurs, aux organismes de recherche et d'autres partenaires. Le consortium Car2Car s'est fixé l'objectif d'améliorer la sécurité routière, de gérer efficacement le trafic à travers l'utilisation des IVC. Les principales missions du consortium de communication Car2Car sont les suivantes : (i) la création d'un standard européen ouvert pour les communications V2V basé sur des composants LAN sans fil, (ii) développement des prototypes et des démonstrateurs des systèmes V2V pour les applications de sécurité routière, (iii) promotion de l'attribution d'une bande de fréquence exclusive libre pour les applications de Car2Car en Europe, et (iv) développement des stratégies de déploiement et des modèles économiques pour la pénétration du marché.

Actuellement, le consortium prévoit un grand événement pour Octobre 2008 démontrant l'interopérabilité entre voitures de différents constructeurs automobiles et équipementiers

d'OBU (*On-Board Unit*) et RSU (*Road Side Unit*). L'événement présentera des démonstrations d'applications de sécurité routière utilisant les réseaux ad hoc.

2.4 Caractéristiques, contraintes et défis

2.4.1 Caractéristiques des réseaux de véhicules

Les réseaux véhiculaires ont des caractéristiques spécifiques qui les distinguent des autres types de réseaux mobiles (réseaux ad hoc, réseaux de capteurs).

☺ **Capacité de traitement, d'énergie et de communication** : contrairement au contexte des réseaux ad hoc ou des réseaux de capteurs où la contrainte d'énergie, à titre d'exemple, représente une des problématiques traitées dans la littérature, les éléments du réseau VANET n'ont pas de limite en terme d'énergie et disposent d'une grande capacité de traitement et peuvent avoir plusieurs interfaces de communication (WiFi, Bluetooth, et autres) ;

☺ **Environnement de déplacement et modèle de mobilité** : les environnements pris en compte dans les réseaux ad hoc mobiles sont souvent limités à des espaces ouverts ou indoor (comme le cas d'une conférence ou à l'intérieur d'un bâtiment). Les déplacements des véhicules quant à eux sont liés aux infrastructures routières soit dans des autoroutes ou au sein même d'une zone métropolitaine. Les contraintes imposées par ce type d'environnement, à savoir les obstacles radio (ex: dus aux immeubles) et les effets du multipath et de fading, affectent considérablement le modèle de mobilité et la qualité des transmissions radio à prendre en compte dans les protocoles et les solutions proposées. En outre, la mobilité est liée directement au comportement des conducteurs ;

☺ **Forte mobilité, topologie du réseau et connectivité** : à la différence des réseaux ad hoc et des réseaux de capteurs, les réseaux VANET sont caractérisés par une forte mobilité, liée à la vitesse des voitures qui est davantage importante sur les autoroutes. Par conséquent, un élément peut rapidement rejoindre ou quitter le réseau en un temps très court, ce qui rend les changements de topologie très fréquents. De plus, des problèmes tels que le partitionnement du réseau peuvent fréquemment apparaître, essentiellement quand le système IVC n'est pas largement répandu et équipé dans la majorité des véhicules. Une des contraintes et des paramètres à étudier de près est le problème de fragmentation du réseau VANET en fonction des conditions spatiotemporelles, notamment quand le taux de pénétration de ces systèmes dans le marché est faible. Cela implique une connectivité faible et des durées de vie des routes très limitées. Par ailleurs, les propriétés inhérentes aux réseaux VANET notamment en termes de

taille ouvrent des problématiques de passage à l'échelle et nécessitent une révision complète des solutions existantes.

2.4.2 Challenges pour la mise en place des réseaux de véhicules

Les réseaux de véhicules sont encore en phase expérimentale et beaucoup de verrous (techniques, sociétaux, économiques) [33] doivent être encore levés.

2.4.2.1 Challenges socio-économiques

Parmi les **verrous sociaux** à lever, il y a tout d'abord celui de la "pénétration du marché". En effet, les services et les applications qui sont basés sur la simple communication inter-véhicule et n'impliquant pas d'infrastructure fonctionnent seulement dans le cas où un taux de pénétration suffisant de véhicules équipés a été atteint. En raison des longs cycles de vie des véhicules, un taux de pénétration approprié peut seulement être atteint après plusieurs années, même si toutes les voitures nouvellement produites ont été équipées en juste proportion. C'est pourquoi, il faut songer aux stratégies d'introduction graduelle du marché :

- proposer des services à base d'infrastructure existante et donc appartenant à l'opérateur (accès à Internet, échange de données de voiture-à-domestique, etc.) qui peuvent motiver des conducteurs à investir dans l'équipement sans fil supplémentaire pour leurs véhicules ;
- obliger les automobilistes à équiper leur voiture par un module IVC conformément à une loi dont le but est d'assurer la sécurité routière ;
- offrir des avantages (des réductions sur les abonnements, les assurances, etc.) aux premiers clients de la technologie.

Un autre verrou social important à surmonter concerne l'interopérabilité de la technologie et l'universalité des services dédiés aux réseaux de véhicules. En effet, un véhicule équipé d'un système IVC doit pouvoir rouler sur toutes les routes de la planète. Ceci mène à une présence potentielle de la technologie partout dans le monde. Par conséquent, les gouvernements doivent se mettre d'accord sur une bande de fréquence commune dédiée aux communications inter-véhicules dans le monde. De plus, lors de la conception de nouveaux services, il faut prendre en considération les spécificités de la conduite dans certains pays telle que la conduite à gauche et la conduite à droite.

Les **verrous économiques** et donc les "business model" représentent également un défi important pour la commercialisation des services basés sur les réseaux de véhicules étant donné que de tels services représentent un nouveau marché basé sur une nouvelle technologie. Il est important donc de penser à un ensemble de mécanismes permettant aux différents acteurs impliqués (opérateurs, industriels du logiciel, OEM, constructeurs d'automobiles, etc...) de créer de la valeur à travers la proposition de valeur faite à ses clients, et de capter cette valeur pour la transformer en profits. Ce modèle d'entreprise résume donc la façon dont l'entreprise prévoit de servir ses clients :

- identifier un segment de marché,
- formuler une stratégie concurrentielle,
- définir les stratégies de publicité et de distribution,
- spécifier les mécanismes de génération de revenus,
- définir les stratégies pour conquérir et fidéliser les clients (encourager la coopération avec une sorte de rémunération par exemple).

2.4.2.2 Challenges techniques

Les propriétés des réseaux de véhicules offrent des challenges techniques importants tels l'accès au canal, le routage et la dissémination des données, l'auto-organisation, la sécurité, l'adressage, etc...

La sécurité : la sécurité [34] est un défi majeur ayant un grand impact sur le futur déploiement des réseaux véhiculaires ainsi que leurs applications. Dans ce contexte, le développement des mécanismes de sécurité instituant les relations de confiance entre les entités communicantes et garantissant le contrôle d'accès aux services de même que la sécurité des transferts de données, s'avère d'une importance capitale.

L'auto-organisation : l'auto-organisation [35] est un sujet critique pour les réseaux de véhicules. Elle vise à tirer parti des propriétés des véhicules pour dégager une structure permettant l'aménagement du réseau. Cette structure se doit d'être suffisamment autonome et dynamique pour supporter tout changement local au niveau d'un ou plusieurs véhicules singuliers.

L'accès au canal [36] : les réseaux de véhicules utilisent des communications radio. Par conséquent, il est important de concevoir des solutions MAC spécifiques aux réseaux de véhicules. Des protocoles qui permettent d'apporter de la qualité de service et de gérer les priorités en résolvant les problèmes d'interférences radio, des problèmes de multi-trajets des

ondes, les irrégularités électromagnétiques, de l'allocation de ressource distribuée dans une topologie dynamique, etc...

Le routage et la dissémination [37] : pour pouvoir communiquer entre eux, les véhicules doivent définir un protocole de routage. En effet, quand les terminaux ne sont pas à une portée de transmission radio directe, le routage unicast est exigé pour établir la communication entre deux véhicules ou entre un véhicule et un relais fixe. Chaque véhicule peut donc prendre le rôle d'un émetteur, récepteur ou routeur.

La dissémination d'information [38] quant à elle, consiste à acheminer une information d'une source vers une ou plusieurs destinations, en assurant un délai d'acheminement réduit, une grande fiabilité et une meilleure utilisation des ressources.

2.5 Problématique et objectifs : le défi du routage et de la dissémination

Dans le cadre de cette thèse, on s'attaque à un des verrous technologiques cités ci-dessus, à savoir le routage et la dissémination des données. En effet, le routage des messages dans les réseaux de véhicules est un grand défi auquel s'intéresse de nombreux chercheurs et constructeurs automobiles qui le traitent dans plusieurs projets [27].

En analysant les services et applications fournis au sein des réseaux de véhicules [39], nous pouvons constater que certaines applications telles que le suivi de voitures, la connexion à Internet, etc... nécessitent l'établissement d'une communication point à point (unicast). D'autres applications utilisent des communications one-to-many (Informations sur le trafic, Message d'alerte, etc...).

Les architectures de communication des réseaux de véhicules doivent donc intégrer des mécanismes de routage et de dissémination des données efficaces et adaptés pour répondre aux besoins des services et applications envisagés.

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

(i) Les caractéristiques des applications ciblées : comme on a pu voir dans la section 2.2.1, on peut distinguer deux types d'applications avec les réseaux de véhicules, les applications de confort et les applications de sécurité routière. Les contraintes de ces applications sont différentes. Comme exemple à cela, la vitesse de propagation de l'information : dans le cas d'un

accident, il faut prévenir les usagers dans un temps borné alors que la diffusion de publicité n'a pas cette contrainte de temps mais elle sera plus consommatrice de bande passante.

(ii) Environnement de déplacement : on distingue les environnements suivants :

- autoroute : environnement ouvert caractérisé par une grande vitesse de déplacement (avec des limites : vitesse min et vitesse max), avec des dépassements de véhicules et une densité de nœuds qui est fonction de l'heure de la journée, du jour de la semaine et de la période de l'année ;
- ville : vitesse modérée avec une probabilité d'intersection plus grande. Il existe des endroits d'arrêt aux feux, des densités de voitures plus ou moins grandes et l'existence de routes plus fréquentées que d'autres (routes principales, endroit commercial ou touristique par exemple);
- rase campagne : caractérisée par des vitesses moins importantes avec une densité de voitures plus faible.

(iii) Les spécificités des réseaux de véhicules : toute nouvelle solution doit faire face aux caractéristiques des réseaux de véhicules citées dans la section 2.4.1 (forte mobilité des voitures qui est plus importante sur les autoroutes, mobilité contrainte et quelque peu prévisible, fragmentations fréquentes du réseau). Plus particulièrement, on doit prendre en compte un paramètre clé ; à savoir la connectivité. En effet, les réseaux de véhicules font partie des réseaux à connectivité partielle ou intermittente. Cette connectivité dépend essentiellement de la densité du trafic routier qui peut varier en fonction des conditions spatio-temporelles : (i) trafic dense (comme aux heures de pointe dans un environnement urbain) (ii) trafic peu dense (la nuit en rase campagne).

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux communications inter-véhicules dans un environnement urbain. Notre objectif est de proposer des solutions de routage ad hoc et de dissémination géo-localisée, adaptées à un environnement ville, répondant à la fois aux exigences et besoins technologiques des cadres d'utilisation envisagés (principalement des services d'information et de confort), mais aussi et surtout aux contraintes des communications inter-véhiculaires ad hoc. Dans ce contexte là, le chapitre 3 décrit la première contribution de cette thèse à savoir notre approche décentralisée pour l'estimation de la densité des voies de circulation. Notre proposition de routage basé sur les intersections est présentée dans le chapitre 4 et notre solution de diffusion géo-localisée est décrite dans le chapitre 5.

Chapitre 3

IFTIS : UN MECANISME DISTRIBUE POUR L'ESTIMATION DU TRAFIC ROUTIER DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN

3.1 Introduction

Depuis l'avènement du GPS pour les particuliers, connaître l'état du trafic est certainement devenu l'un des alliés les plus précieux des automobilistes. En effet, fournir une telle information aux usagers de la route rendrait la vie plus agréable sur nos routes et pourrait ainsi indirectement contribuer à les rendre plus sûres en agissant sur le comportement des conducteurs (réduction du temps passé sur les routes notamment).

Outre l'utilité de cette information pour les automobilistes, des données telles que la densité de trafic sur les voies de circulation sont utiles pour les communications au sein des réseaux de véhicules. En effet, de nombreux travaux ont été menés pour garantir l'acheminement des messages (couche réseau) dans les réseaux ad hoc de véhicules. Cependant, ces protocoles de routage souffrent du problème de connectivité, un des principaux défis à relever dans les réseaux de véhicules. Fournir le moyen à tout véhicule d'estimer le trafic routier sur des tronçons de route s'avère donc doublement utile.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche décentralisée pour l'estimation du trafic routier dans un environnement urbain. La suite de ce chapitre est organisée comme suit. La section suivante présente la problématique liée à l'estimation du trafic routier. Dans la section 3, nous décrivons les systèmes de gestion de trafic existants et leurs inconvénients. La section 4 détaille la solution proposée pour estimer la densité d'un tronçon de route d'une manière distribuée. Dans la section 5, nous décrivons l'environnement de simulation et présentons les résultats obtenus pour évaluer les performances de la solution proposée. Dans la section 6, nous discutons les cadres d'utilisation de notre approche. La section 7 conclut ce chapitre.

3.2 Problématique posée

Les systèmes de régulation de trafic existants sont le plus souvent basés sur des infrastructures centralisées coûteuses en termes de déploiement et de maintenance. De plus, ils permettent de caractériser uniquement l'état global du trafic routier au niveau d'une voie de circulation.

Par ailleurs, les quelques solutions de gestion de trafic décentralisées publiées récemment, sont plutôt adaptés à la conduite dans un environnement autoroute et ne sont pas optimales en termes d'utilisation de la bande passante.

La problématique posée découle donc de ces deux constatations, sur le fait qu'il n'y est pas (à notre connaissance) de solutions distribuées, légères en termes d'utilisation de ressources radio et qui permettent de caractériser d'une manière fine la densité linéaire d'un tronçon de route dans un environnement urbain.

3.3 Approches existantes

Dans cette section, nous allons discuter plus en détails les avantages et les inconvénients des différents systèmes de gestion de trafic existants.

Les systèmes de gestion de trafic 'conventionnels' [40], [41] sont basés sur des infrastructures centralisées où des caméras et des capteurs implantés sur la route collectent en permanence des informations sur la densité et l'état du trafic et transmettent ces données à une unité centrale pour les traiter et prendre les décisions adéquates. De tels systèmes nécessitent un coût de déploiement assez important et se distinguent également par un temps de réaction long pour le traitement et le transfert des informations, dans un contexte où le délai de transmission de l'information revêt une importance majeure. De plus, les équipements mis en place sur les routes nécessitent une maintenance périodique et chère. Par conséquent, pour un large déploiement d'un tel système, un important investissement dans l'infrastructure de communication et de capteurs est nécessaire.

Pour surmonter les inconvénients des approches centralisées mentionnées ci-dessus, des initiatives vers la décentralisation des systèmes de gestion du trafic ont commencé à voir le jour. Dans le travail décrit dans [42], les auteurs proposent un système d'estimation du trafic routier appelé SOTIS (*Self-Organizing Traffic Information System*), basé sur les communications inter-véhicules. Chaque véhicule participant au système détient une table de voisinage dans laquelle il garde la position géographique de ses voisins. Cette table est mise à jour régulièrement à l'aide de

messages *Hello* échangés périodiquement entre tous les véhicules. A partir de sa propre table de voisinage, chaque nœud SOTIS calcule ses conditions de trafic local. Ensuite, il diffuse des informations relatives à ses conditions de trafic à tous les nœuds voisins et ceci à des intervalles de temps réguliers. Cette diffusion massive risque de provoquer une saturation de la bande passante du réseau, notamment dans le cas où le réseau routier comprend un nombre élevé de nœuds. De plus, étant donné que deux nœuds voisins partagent globalement les mêmes conditions de trafic local, le fait de calculer les conditions de trafic au niveau de chaque nœud mobile implique une redondance qui se traduit non seulement au niveau du calcul mais également au niveau de la diffusion de ces conditions de trafic. En effet, deux nœuds voisins vont fournir globalement les mêmes informations sur les conditions de trafic.

Dans [43], les auteurs proposent dans le cadre du projet *e-road*, un système appelé *TrafficView* permettant à une voiture donnée de disposer d'informations sur les véhicules qui se trouvent en amont. Pour ce faire, chaque véhicule participant au système doit être équipé d'un GPS et d'une interface WiFi. A partir des échanges périodiques d'informations entre les deux flux de véhicules circulant en sens inverse, chaque véhicule regroupe une masse de données concernant la position et la vitesse de déplacement des autres véhicules lors d'une étape d'agrégation. Ensuite, l'étape suivante consiste à restituer le résultat de l'agrégation afin que le conducteur puisse avoir une idée du trafic en amont. Un tel mécanisme permet d'estimer en temps réel l'état du trafic au niveau d'un tronçon de quelques centaines de mètres en amont. Il est adapté à la conduite dans un environnement autoroutier afin de faciliter les dépassements. Toutefois, ce mécanisme est moins utile dans un environnement urbain où on a besoin de connaître l'état du trafic au niveau d'un tronçon avant d'y entrer (au niveau d'une intersection par exemple) afin de donner la possibilité à un conducteur de changer d'itinéraire et d'éviter un éventuel embouteillage.

Le mécanisme IFTIS (*Infrastructure-Free Traffic Information System*) que nous proposons permet de pallier aux inconvénients mentionnés ci-avant. Pour ce faire, IFTIS propose un procédé d'estimation de la densité d'un tronçon de route entre deux intersections d'une manière distribuée et ne nécessite qu'un nombre limité de paquets à échanger entre les véhicules. Un tel mécanisme permet de caractériser de manière plus fine la densité de trafic du tronçon, en fournissant une distribution spatiale des véhicules mobiles sur la voie de circulation.

3.4 Un mécanisme distribué pour l'estimation du trafic routier

3.4.1 Hypothèses

Dans IFTIS, on suppose que chaque véhicule participant au mécanisme d'estimation de densité de trafic est équipé d'un moyen de localisation via un système naïf comme le GPS, d'un module wi-fi et d'une cartographie lui permettant d'identifier la voie de circulation. On suppose aussi qu'un tel véhicule connaît la position de ses voisins circulant sur la même voie. La connaissance du voisinage est périodiquement mise à jour à l'aide de messages *Hello* échangés entre les véhicules voisins.

3.4.2 Description détaillée du mécanisme

Le mécanisme IFTIS consiste à faire circuler un même paquet d'agrégation entre des groupes de voitures, tout au long d'un tronçon découpé en un ensemble de cellules adjacentes. Ce paquet permet de collecter l'intégralité des données de densité du trafic disponibles sur la voie de circulation. Notons qu'il y a seulement certains véhicules, appelés *nœuds principaux* (group leaders), qui peuvent générer et enrichir ce paquet d'agrégation.

3.4.2.1 Découpage du tronçon et formation des groupes

Chaque tronçon de route situé entre deux intersections est découpé en un ensemble de cellules adjacentes de sorte que toute la voie soit couverte. La taille de chaque cellule est définie en fonction de la portée radio d'un véhicule. On peut supposer que cette opération de découpage est réalisée au préalable sur la carte numérique des véhicules participant au mécanisme IFTIS en association avec un point d'ancrage situé au centre de chaque cellule et dont les coordonnées sont mémorisées. Autrement, cette opération de découpage pourrait se faire en temps réel³ et d'une manière dynamique au niveau du véhicule lui-même. En effet, un tel véhicule peut calculer le centre de chaque cellule à partir d'un paramètre de longueur de la voie de circulation et d'un paramètre de portée de transmission du module wifi.

La figure 3.1 montre un exemple de découpage d'un tronçon de route X reliant deux intersections consécutives notées I_n et I_{n+1} d'un réseau routier. Ce tronçon X est découpé en quatre cellules de couverture X1, X2, X3, X4 adjacentes, de même rayon R et de centres C1, C2,

³ La réalisation de ce découpage en temps réel permet d'utiliser directement des systèmes de navigation avec des cartes routières numériques standards sans modifications.

à une intersection destination. Ainsi, parmi tous les véhicules arrivant au niveau de l'intersection destination dans un intervalle de temps donné, un seul générera un paquet d'agrégation CDP. Il s'agit en effet d'un véhicule ayant préalablement enrichi un paquet d'agrégation en tant que *nœud principal*. De cette manière, l'émission des paquets d'agrégation est autorégulée et limitée dans le temps, ce qui permet de limiter l'utilisation de la bande passante du réseau et par la même d'éviter l'engorgement du réseau par une multitude de paquets CDP identiques. De plus, cette auto-régulation permet de capter la dynamique de la voie. En effet, plus la traversée de la voie est rapide, plus son état (densité de trafic) sera dynamique, plus on générera de paquets CDP.

Le format d'un paquet d'agrégation CDP est décrit dans la figure 3.2 ci-dessous, où N_1, \dots, N_k désignent par exemple le nombre de véhicules présents dans les cellules X_1, \dots, X_k respectivement.

Cells Data Packet (CDP)		
Identifiant du tronçon de route courant : X	Instant de transmission : t_f	Intersection source I_f
Identifiant des cellules de couverture	Position du centre des cellules de couverture	Données de densité de trafic au sein des cellules
X_1	C_1	N_1
X_2	C_2	N_2
...
X_k	C_k	N_k

Figure 3.2 : Format d'un paquet d'agrégation CDP.

Ainsi, lorsqu'un *nœud principal* génère un nouveau paquet CDP, il insère:

- l'identifiant X du tronçon de route sur lequel il se situe encore partiellement et qu'il vient de parcourir, dans le champ « Identifiant du tronçon de route courant » ;
- le temps t_1 correspondant à l'instant de génération du paquet CDP dans le champ « Instant de transmission » ;
- les coordonnées S de l'intersection source I_1 , dans le champ « Intersection source » ;
- l'identifiant X_1, X_2, \dots, X_k de chaque cellule du tronçon de route X , dans le champ « Identifiant de la cellule » ;

- les coordonnées géographiques (références GPS) des points d'ancrage C_1, C_2, \dots, C_k correspondant aux centres de chaque cellule dans le champ « position du centre de la cellule ».

Ensuite, il l'envoie dans le sens inverse de son déplacement, c'est-à-dire de l'intersection destination vers l'intersection source.

On notera que lors de la création du paquet CDP, le champ « Données de densité de trafic » est vide pour chaque cellule identifiée. Ce champ sera rempli ultérieurement par le *nœud principal* de chaque cellule au fur et à mesure que le paquet transitera d'une cellule à une autre.

3.4.2.2 Envoi et mise à jour d'un paquet CDP

Le paquet d'agrégation est transmis de cellule en cellule suivant les points d'ancrage définis au niveau de l'entête du paquet CDP. Ces points d'ancrage correspondent, comme mentionné ci-avant, aux centres des cellules.

Afin d'envoyer le paquet vers le prochain point d'ancrage, une approche gloutonne est utilisée. Cette dernière consiste à sélectionner parmi tous les voisins du véhicule porteur du paquet CDP, le véhicule le plus proche du prochain point d'ancrage. On notera que dans le cas où le véhicule porteur du paquet CDP ne possède aucun nœud voisin à cet instant, il garde le paquet d'agrégation qu'il porte jusqu'à ce qu'il rencontre un voisin plus proche ou qu'il atteigne lui-même le point d'ancrage destination.

Lorsque le paquet CDP est reçu par un *nœud principal*, ce dernier enrichit le paquet d'agrégation CDP en y insérant le nombre de nœuds dans la cellule à laquelle il appartient. Ensuite, il renvoie le paquet vers le prochain point d'ancrage.

On notera que lorsque le rayon des cellules de couverture est choisi au moins égal à la portée de transmission d'un véhicule, l'ensemble des voisins d'un nœud principal d'une cellule correspond au groupe de véhicules associés à cette cellule, ces véhicules étant identifiés dans la table de voisinage du nœud principal. De ce fait, les données de densité de trafic local de cette cellule sont directement obtenues par le nœud principal à partir de sa table de voisinage. Autrement dit, un tel découpage permet d'obtenir de manière simple et efficace, la densité d'une cellule, à partir de la table de voisinage d'un nœud principal.

La figure 3.3 montre un exemple d'acheminement d'un paquet CDP tout au long de la voie de circulation X. Pour ce faire, l'ensemble des coordonnées des points d'ancrage $\{C_3, C_2, C_1\}$ et

de l'intersection source I_1 définit un chemin destiné à être suivi par le paquet d'agrégation pour atteindre l'intersection source I_1 .

Ainsi, comme représenté sur la figure 3.3, le paquet CDP est généré par le nœud 1 qui est proche de l'intersection destination I_2 . Au fur et à mesure que le paquet CDP transite par les nœuds principaux des cellules X_3, X_2, X_1 , le nombre de véhicules présents dans ces cellules (N_3, N_2, N_1) y sont successivement insérés.

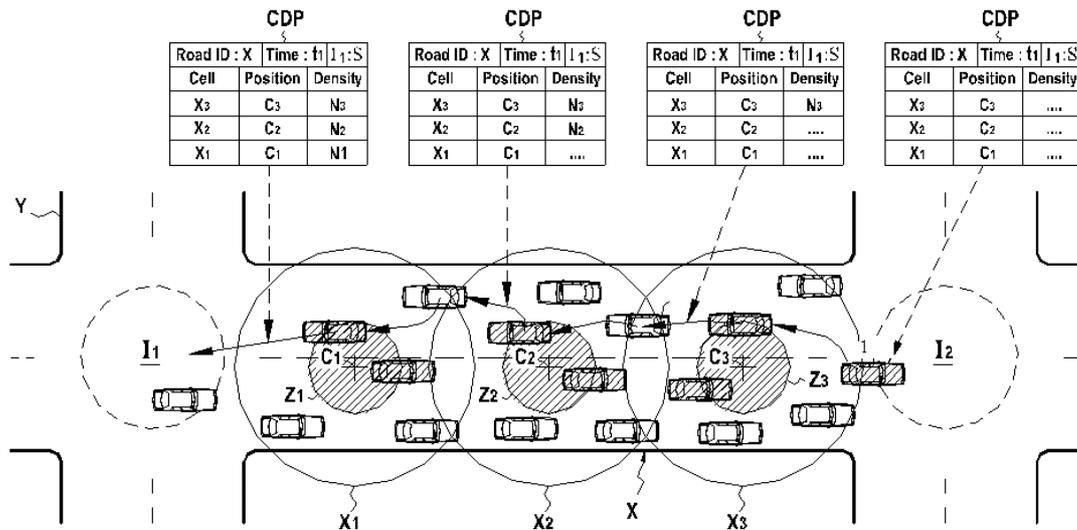


Figure 3.3 : Acheminement d'un paquet CDP tout au long d'une voie.

3.4.2.2.3 Analyse du contenu d'un paquet CDP complet

Lorsque le paquet CDP atteint sa destination finale (l'intersection source), il contient l'intégralité des données de densité de trafic locale de chaque cellule (c'est-à-dire les nombres de véhicules N_1, N_2 et N_3 dans l'exemple ci-dessus). Ces informations constituent une estimation fiable de la densité de trafic sur la voie de circulation étant donnée qu'une courte durée sépare le moment où le paquet d'agrégation est généré et le moment où celui-ci arrive au niveau de l'intersection source. Cette durée correspond au temps mis par le paquet d'agrégation pour remonter la voie de circulation (en multi-sauts et/ou transporté par le véhicule même).

Ce paquet CDP complet sera ensuite diffusé au niveau de l'intersection source de sorte que chaque véhicule qui est susceptible d'entrer sur la voie de circulation au niveau de l'intersection source pour atteindre l'intersection destination, reçoive le paquet d'agrégation contenant les informations de densité de trafic dernièrement connues sur cette voie de circulation.

On note que le dénombrement des groupes de véhicules associés à chaque cellule permet de caractériser de manière plus fine la densité de trafic du tronçon, en fournissant une distribution spatiale des véhicules mobiles sur la voie de circulation. En particulier, ce dénombrement local permet de localiser une congestion sur la voie de circulation en identifiant une cellule présentant une densité très forte. On peut également utiliser ce dénombrement local pour caractériser l'état global du trafic au niveau de la voie de circulation moyennant des outils statistiques (moyenne, variance, etc...).

3.5 Evaluation des performances

Dans cette section, nous allons réaliser un ensemble de simulations dont le but est d'étudier les performances du mécanisme IFTIS en termes de fiabilité de l'estimation de la densité d'un tronçon et de durée de remontée d'un paquet d'agrégation CDP.

Dans un premier temps, nous allons décrire l'environnement de simulation utilisé, à savoir le simulateur Qualnet [44] et le modèle de mobilité VanetMobiSim [45]. Une attention particulière sera accordée à la conception et la définition d'un modèle de mobilité réaliste dans les réseaux de véhicules étant donné son grand impact sur l'étude de performance d'une solution. Nous présentons ensuite le scénario de simulation ainsi que les résultats obtenus.

3.5.1 Environnement de simulation

Plusieurs simulateurs ont été conçus pour étudier les performances des réseaux, tels que Network Simulator 2 [46], OPNET [47], OMNET++ [48], etc... Notre choix s'est porté sur QualNet [44], la version commerciale de GloMoSim [49]. Ce choix se justifie par la large diffusion de ce simulateur auprès de la communauté scientifique et par sa souplesse puisque le code source peut facilement être modifié selon le besoin.

3.5.1.1 Le simulateur Qualnet

QualNet est un simulateur basé sur un ensemble de modules et de bibliothèques simulant chacune un aspect particulier des réseaux filaires ou sans fil sur une couche particulière du modèle OSI comme le montre la figure 3.4 ci-dessous :

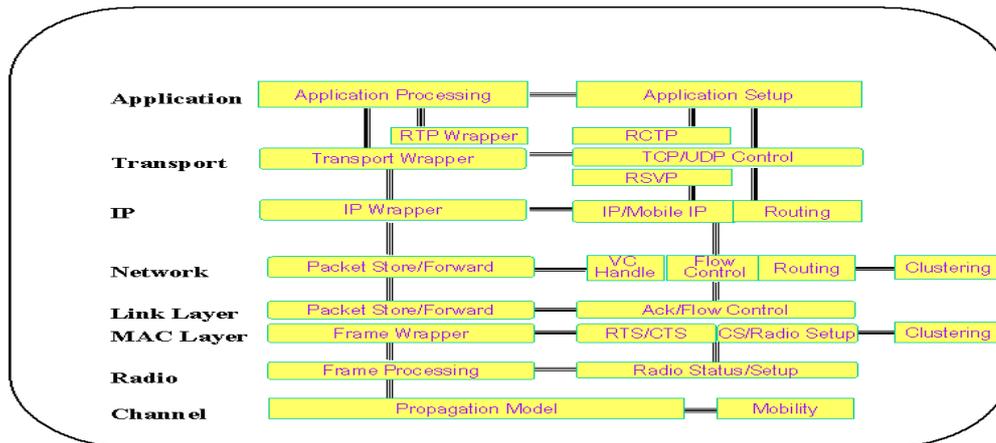


Figure 3.4 : Architecture de QualNet.

QualNet est développé en langage PARSEC (*PARallel Simulation Environnement for Complex systems*), langage qui permet la simulation parallèle des processus via des messages et des entités indépendantes. Sa conception modulaire permet une grande souplesse en ce qui concerne l'extension ou l'ajout de certaines fonctionnalités basiques. La possibilité de monter en échelle et la définition d'un API standard pour l'interfaçage de la pile protocolaire offrent la possibilité de tester différents modèles.

3.5.1.1.1 Les modèles de propagation sous QualNet

Les modèles de propagation sont utilisés pour déterminer la manière dont le signal radio va se propager dans l'environnement que l'on souhaite simuler. Quand un signal est émis avec une puissance P_t , un modèle de propagation permet d'estimer la puissance P_r reçue en tout point de l'espace. Le simulateur QualNet prend en considération trois modèles de propagation qui influenceront en particulier sur la manière dont seront atténués les signaux en fonction de la distance :

1. Modèle en espace libre (Free Space)

Ce modèle considère le cas idéal où il n'y a qu'un seul chemin de propagation entre l'émetteur et le récepteur qui sont en vue directe. Il se base sur la formule suivante pour calculer la puissance reçue à une distance d de l'émetteur :

$$Pr(d) = \frac{Pt.Gt.Gr.\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3.1)$$

où P_t est la puissance de transmission, G_t et G_r les gains respectifs des antennes de l'émetteur et du récepteur, L est la perte du système et λ la longueur d'onde.

2. Modèle de réflexion sur le sol (Two ray Ground reflexion)

Un autre modèle fondamental de propagation est celui de la réflexion sur le sol, illustré par la figure 3.5. L'onde captée par le récepteur est composée de l'onde directe ainsi que d'une onde réfléchie sur le sol. Si la distance entre l'émetteur et le récepteur est assez grande, ce modèle donne des résultats plus réalistes que le modèle Free Space. La formule pour le calcul de la puissance reçue à une distance d est la suivante :

$$\text{Pr}(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (3.2)$$

où h_t et h_r sont les hauteurs des antennes de transmission et de réception.

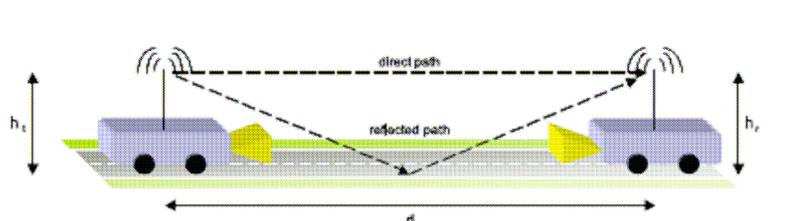


Figure 3.5 : Modèle de réflexion sur sol.

3. Modèle PathLoss Matrix:

Ce modèle de PathLoss s'appuie sur le fait que des résultats théoriques ainsi que des mesures pratiques ont montré que la puissance reçue par un noeud diminue de manière logarithmique en fonction de la distance et ceci aussi bien pour une transmission en intérieur qu'en l'extérieur. En se basant sur ces résultats, la formule de PathLoss retenue pour ce modèle est la suivante :

$$\text{PL}[\text{dB}] = \text{PL}(d_0)[\text{dB}] + 10 n \log (d/d_0) \quad (3.3)$$

où n est un exposant qui va varier en fonction de l'environnement (la littérature nous fournit ses différentes valeurs) et $\text{PL}(d_0)$ est une estimation empirique ou théorique du PathLoss en décibels pour une distance d_0 .

On notera que dans QualNet 3.9, les modèles de propagation sont très simples par rapport à la réalité car ils ne prennent pas en considération les différents phénomènes pouvant influencer sur la qualité du signal tels que les obstacles. Ils prennent seulement en compte l'atténuation du signal en fonction de la distance.

3.5.1.1.2 Les modèles de mobilité sous QualNet

Un modèle de mobilité reflète le comportement spatio-temporel des nœuds mobiles dans un réseau, où le but est de représenter au mieux les conditions de déplacements dans un contexte particulier du monde réel. Le simulateur QualNet définit deux modèles de mobilités : *Random Way Point* et *Trace File*.

Le modèle *Random Way Point* (RWP) [50] est l'un des modèles de mobilité les plus répandus et utilisés dans les simulations. Dans ce modèle, chaque nœud choisit individuellement une destination aléatoire dans la limite géographique du réseau et choisit également une vitesse aléatoire de déplacement (comprise entre une vitesse minimum et maximum). Une fois que le nœud a atteint la destination, il effectue une pause pendant une période de temps aléatoirement choisie dans un intervalle de temps pré-défini. Après ce temps de pause, le nœud répète le processus, en choisissant une destination et une vitesse aléatoire différentes. Dans ce cas, les nœuds mobiles se déplacent aléatoirement et indépendamment les uns des autres. On notera qu'il existe d'autres modèles de mobilité [51] appelés "modèles de mobilité de groupe" qui représentent les nœuds mobiles dont les mouvements dépendent les uns des autres. Ces modèles sont adaptés aux applications impliquant des communications entre les groupes et supposent une coordination des déplacements entre les nœuds d'un même groupe.

Un autre modèle disponible dans QualNet est le *Trace File* qui permet d'utiliser des positions pré-calculées par un autre logiciel. C'est cette méthode qui a été utilisée lors de nos simulations, le pré-calcul des positions ayant été effectué en utilisant le logiciel VanetMobiSim/CanuMobiSim [45]. En effet, les modèles de mobilité conçus pour les réseaux ad hoc mobiles à l'instar du RWP ne peuvent pas être directement utilisés dans les réseaux de véhicules où les déplacements et les vitesses sont délimités et prédéfinis par les routes et le comportement des conducteurs.

3.5.1.2 Le modèle de mobilité VanetMobiSim

De nombreux modèles de mobilité, décrivant les déplacements des véhicules suivant une carte routière, ont été publiés récemment. Par exemple, les auteurs dans [52] proposent un modèle de mobilité basé sur les déplacements des véhicules suivant des plans de routes réels et spécifiques. Néanmoins, des aspects comme le temps d'attente aux intersections ou l'existence de routes plus fréquentées que d'autres, n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Dans [53], un modèle de mobilité générique issu de la famille des modèles *Random Trip Mobility* a été étudié. Des simulations ont été réalisées en utilisant des cartes et des plans de villes. Dans [54] un outil appelé MOVE (*MObility model generator for VEhicular networks*) se basant sur SUMO (*Simulation for*

3.5.2 Evaluation des performances d'IFTIS

3.5.2.1 Scénario et paramètres de simulation

Les simulations ont été réalisées avec l'outil QualNet présenté ci-avant. Chaque véhicule transmet grâce à un lien radio 802.11 de débit égal à 2 Mbit/s avec une portée radio de 250 mètres. Nous avons choisi comme modèle de propagation le "Two-Ray ground reflexion model" qui prend en compte l'onde directe et l'onde réfléchiée par le sol. Nous avons utilisé l'outil VanetMobiSim pour générer le mouvement des nœuds. Les positions des nœuds sont ensuite utilisées dans nos simulations QualNet.

L'environnement simulé est une voie de circulation bi-directionnelle de 2500m (figure 3.7). Ce tronçon de route, situé entre deux intersections, est decoupé en cinq cellules adjacentes dont le rayon est de 250m (égal à la portée radio). On a introduit un feu de signalisation (pour passage piéton par exemple) afin de créer une perturbation au niveau du flux de véhicules, et par conséquent, une variation spatio-temporelle importante au niveau du trafic routier. Enfin, nous noterons que les véhicules se déplacent tout au long de ce tronçon avec une vitesse qui varie de 40 à 60 km/h (vitesse de déplacement des voitures dans un environnement urbain). Le tableau 3-1 récapitule l'ensemble des paramètres de simulation utilisés.

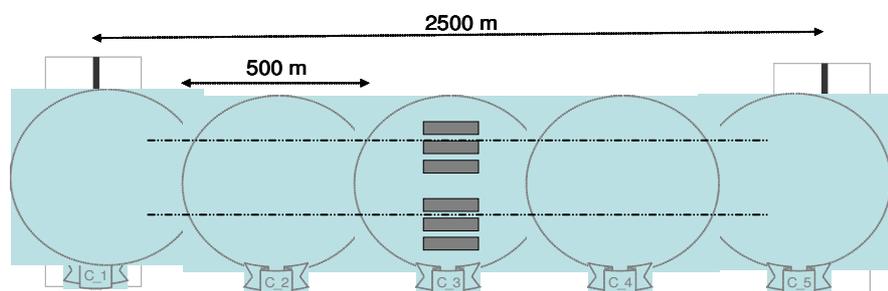


Figure 3.7 : Scénario de simulation.

Tableau 3-1: Paramètres de simulation.

SIMULATION / SCENARIO		MAC / ROUTAGE	
Temps de simulation	400s	Protocole MAC	802.11 DCF
Longueur du tronçon	2500 m	Capacité du canal	2 Mbps
Modèle de mobilité	VanetMobiSim [45]	Portée radio	~250 m
Temps d'attente	3 à 6s	Zone d'ancrage Zi	40 m
Vitesse des véhicules (ville)	40-60±5 Km/h	Modèle de propagation	Two-Ray ground reflexion

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de simulations ainsi que leurs interprétations. On notera que les résultats de simulations correspondent à deux scénarios : un premier scénario "densité forte" pour lequel le nombre total de véhicules qui circulent au niveau du tronçon est

égal à 120 véhicules, et un deuxième scénario "densité faible" pour lequel il y a seulement la moitié des véhicules utilisés dans le premier scénario.

3.5.2.2 Résultats de simulation et analyse des performances

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la fiabilité du mécanisme IFTIS (figure 3.8, figure 3.9 et figure 3.10) en comparant le contenu du paquet CDP, et plus précisément le champ « Données de densité de trafic » où sera stockée la densité de chaque cellule, aux données réelles déduites à partir du fichier trace généré par l'outil VanetMobiSim. Le taux d'erreur relative est défini par le rapport :

$$\frac{|N_{i \text{ estimé}} - N_{i \text{ réel}}|}{N_{\text{total}}} \quad (3.4)$$

où $N_{i \text{ estimé}}$ et $N_{i \text{ réel}}$ représentent respectivement le nombre de véhicules estimé et réel de la cellule C_i et N_{total} représente le nombre total de véhicules qui circulent tout au long du tronçon.

La figure 3.8 représente l'évolution de la densité de la cellule 1 (nombre de véhicules estimés et réels) au cours du temps, et ceci pour les deux scénarios considérés : densité forte et densité faible.

Pour chacun de ces scénarios, deux courbes sont visualisées : une courbe correspondant aux valeurs réelles du nombre de véhicules de la cellule 1 et une courbe correspondant aux valeurs estimées de la même cellule. L'observation de ces courbes montre que l'estimation obtenue grâce au mécanisme IFTIS est assez proche de la valeur réelle de la densité pour les deux scénarios considérés. Par exemple, l'erreur relative pour le scénario forte densité varie de 0% à 4% et elle ne dépasse pas 3% pour le scénario densité faible. Ceci prouve la pertinence de l'information sur le trafic obtenue grâce au paquet d'agrégation CDP. Nous expliquons ceci en partie par le choix judicieux des véhicules qui mettent à jour le paquet CDP. En effet, seuls les nœuds principaux (les véhicules proches des centres des cellules) sont éligibles pour enrichir le paquet CDP en insérant le nombre de leurs voisins. Par conséquent, ces véhicules sont ceux qui ont la meilleure connaissance de la densité de la cellule.

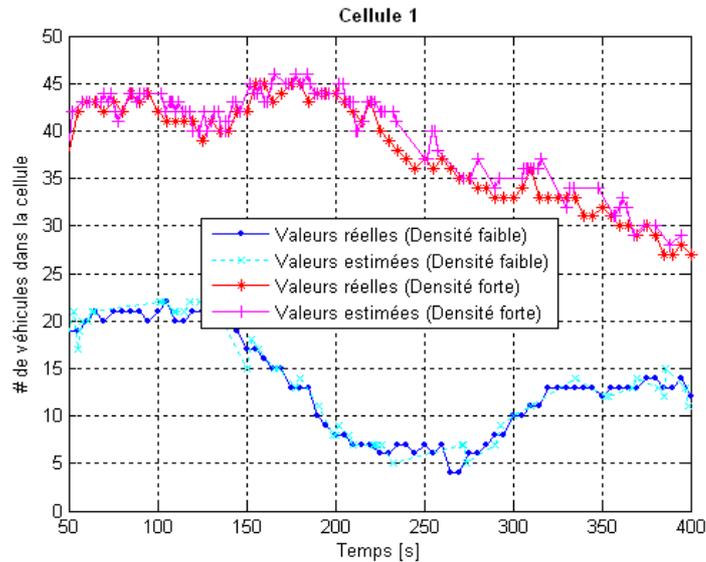


Figure 3.8 : Nombre de véhicules de la cellule 1 vs Temps (scénarios densité faible et forte).

Les figures 3.9 et 3.10 représentent l'évolution du nombre de véhicules dans les cellules 2 et 4 au cours du temps. Etant donné que ces deux cellules sont adjacentes à la cellule où se trouve le feu de signalisation, leur densité connaîtra une variation temporelle assez importante à cause du temps d'attente des véhicules au niveau du feu de la cellule 3. Les courbes de ces deux figures mettent en évidence ce phénomène de "*shockwaves*". Notons que même dans ce cas, l'erreur relative est assez faible (en dessous de 8%); ce qui prouve que le mécanisme proposé arrive à détecter en temps réel une anomalie (embouteillage par exemple) au niveau d'une voie de circulation.

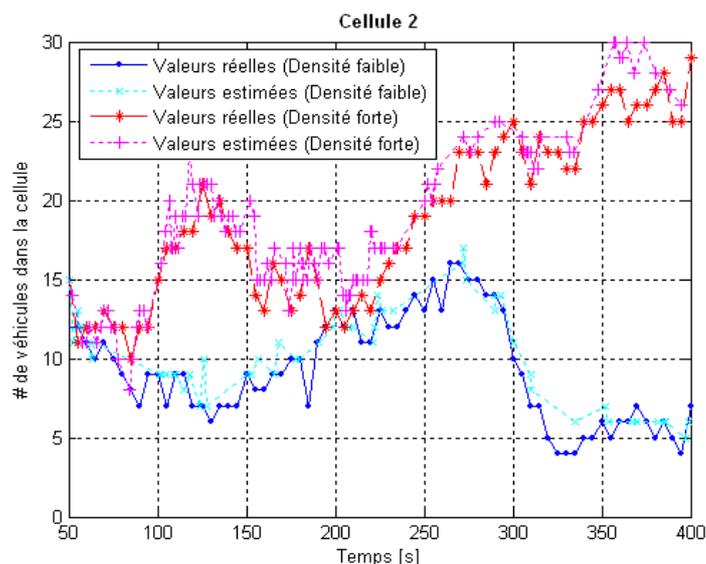


Figure 3.9 : Nombre de véhicules de la cellule 2 vs Temps (scénarios densité faible et forte).

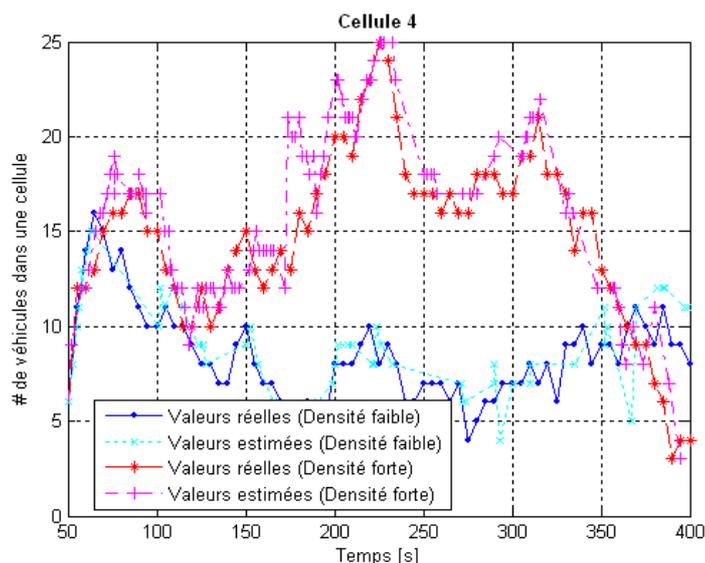


Figure 3.10 : Nombre de véhicules de la cellule 4 vs Temps (scénarios densité faible et forte).

La figure 3.11 montre le délai de bout en bout au cours du temps pour les deux scénarios considérés. Ce délai est calculé comme étant la différence entre le moment où le paquet d'agrégation est généré et le moment où celui-ci arrive au niveau de l'intersection source (durée de remontée du paquet d'agrégation le long de la voie de circulation). La figure nous montre que, d'une manière générale, le délai de bout en bout est moins important dans le scénario "densité forte" que dans le scénario "densité faible". Nous expliquons ceci par la manière avec laquelle est acheminé le paquet d'agrégation entre deux points d'ancrage. En effet, le paquet CDP est envoyé en multi-sauts en utilisant une approche gloutonne et dans le cas d'un « optimum local »⁶, le véhicule garde le paquet d'agrégation qu'il porte en direction du prochain point d'ancrage. Dans le cas du scénario peu dense où il n'y a pas beaucoup de véhicules qui circulent sur le tronçon, on rencontre plus souvent cette situation dénommée « optimum local », ce qui allonge la durée de remontée du paquet CDP.

Par ailleurs, nous notons que plus le délai de transit du paquet d'agrégation est élevé, plus important est l'erreur commise lors de l'estimation de la densité de certaines cellules. Par exemple, le délai le plus important du scénario avec une forte densité est obtenu à $t = 170s$. A ce même instant, nous notons une erreur relative de 5 % entre les valeurs estimées et les valeurs réelles au niveau de la cellule 4. Ceci reste également vrai pour le scénario à faible densité, où l'erreur la plus élevée dans la cellule 4 (8.3 %) est obtenue à $t = 367s$, instant pendant lequel nous avons une durée de remontée du paquet CDP assez importante (7s).

⁶ Situation où le véhicule porteur du paquet CDP ne possède aucun nœud voisin pour lui transférer le paquet

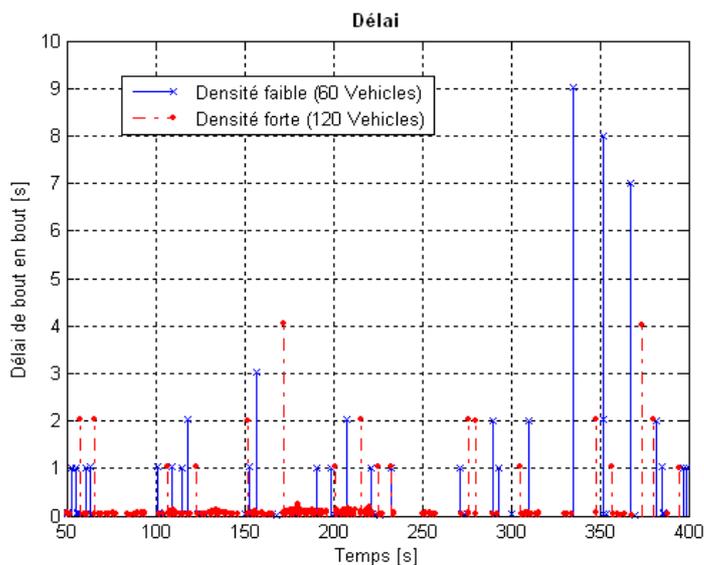


Figure 3.11 : Délai de bout en bout vs Temps.

De manière générale, les résultats de simulation sont assez satisfaisants aussi bien pour le scénario "faible densité" que pour le scénario "forte densité". L'erreur relative lors de l'estimation de la densité de chaque cellule reste faible dans les deux cas. De plus, la durée de remontée de la plupart des paquets d'agrégation n'est pas élevée.

3.6 Discussion

Nous rappelons que le mécanisme IFTIS décrit un procédé d'estimation de la densité de véhicules dans un tronçon de route situé entre deux intersections, d'une manière distribuée, moyennant des paquets d'agrégation échangés entre les véhicules. Un paquet d'agrégation complet contient l'intégralité des données de densité de trafic locale de chaque cellule. Ce dénombrement des groupes de véhicules associés à chaque cellule permet de caractériser de manière plus fine la densité de trafic du tronçon, en fournissant une distribution spatiale des véhicules mobiles sur la voie de circulation. En particulier, ce dénombrement local permet de localiser une congestion sur la voie de circulation, en identifiant une cellule présentant une densité très forte. Ainsi, le mécanisme IFTIS pourrait être utilisé pour mettre en place un service de détection d'embouteillage dans un environnement urbain. Un tel service permettrait d'informer en temps réel les automobilistes des voies de circulation où il y aurait congestion afin qu'ils prennent eux mêmes les décisions à savoir changer d'itinéraire, s'abstenir de circuler, modifier les horaires, etc...

On peut également utiliser ce dénombrement local pour caractériser l'état global du trafic au niveau de la voie de circulation moyennant des outils statistiques (moyenne, variance, etc...). Une telle caractérisation pourrait être très utile lors de la conception d'un nouveau protocole de routage pour les réseaux de véhicules. En effet, la connectivité est un facteur assez important pouvant influencer sur les performances d'un protocole de routage dans un réseau aussi dynamique que le réseau VANET. En prenant en compte les informations de densité de trafic fournies dans les paquets d'agrégation CDP, des chemins de routage des paquets de données peuvent être calculés en temps réel grâce à l'identification de voies de circulation à forte densité de nœuds qui constituent des axes de transmission à très forte connectivité. Ces axes de transmission constituent des axes privilégiés à travers lesquels les paquets de données peuvent transiter de manière optimale (idéal pour la transmission du flux de données nécessitant une forte qualité de services).

3.7 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle approche pour l'estimation du trafic routier au niveau d'une voie de circulation appelé IFTIS. Ce dernier est particulièrement bien adapté aux environnements urbains étant donné qu'il prend en considération la structure urbaine en routes croisées.

Le mécanisme proposé est distribué dans le sens où il n'est pas nécessaire d'avoir une infrastructure pour centraliser l'information ou collecter l'état du trafic comme c'est le cas dans les systèmes de gestion de trafic 'conventionnels'. L'état du trafic routier au niveau d'un tronçon de route est estimé grâce à des paquets de données échangés entre des véhicules équipés par un module wifi et un GPS. En plus de sa nature distribuée, notre approche a l'avantage de limiter le nombre de paquets nécessaires pour transmettre l'information et par conséquent éviter l'engorgement du réseau. En effet, l'intégralité des données de densité de trafic disponibles sur la voie de circulation est obtenue grâce à un paquet d'agrégation CDP, généré au niveau d'une intersection destination et transmis de cellule en cellule jusqu'à l'intersection source. Au fur et à mesure que le paquet CDP passe par le centre d'une cellule, il est enrichi en insérant la densité locale de la cellule correspondante.

Afin d'étudier les performances d'IFTIS, nous avons réalisé un ensemble de simulations à l'aide de l'outil QualNet. Les résultats obtenus montrent la pertinence des données obtenues grâce aux paquets d'agrégation CDP. En effet, l'erreur relative lors de l'estimation de la densité de chaque cellule est faible. De plus, la durée de remontée de la plupart des paquets d'agrégation est faible.

IFTIS, tel que décrit dans ce chapitre, pourrait être utilisé comme base à un système plus global pour la gestion de trafic et la détection d'embouteillage dans un environnement urbain. Ceci représente une perspective qui pourrait étendre ce travail. Par ailleurs, il nous semble aussi intéressant d'intégrer le mécanisme proposé à des protocoles de routage existants, conçus pour les réseaux de véhicules dans un environnement urbain, afin d'utiliser prioritairement les routes où la connectivité serait la plus avantageuse et améliorer ainsi les performances du routage. Nous proposons dans la suite de cette thèse, de concevoir un nouveau protocole de routage qui tire partie du mécanisme IFTIS pour sélectionner des routes robustes à connectivité élevée. Celui-ci est décrit dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

GYTAR : UN PROTOCOLE DE ROUTAGE GEOGRAPHIQUE POUR LES RESEAUX DE VEHICULES DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN

4.1 Introduction

Les communications dans les réseaux de mobiles fortement dynamiques, tels que les réseaux de véhicules, requièrent l'utilisation de protocoles de communication spécifiques. La gestion de l'acheminement de données ou le routage, consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, la connexion entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau. La stratégie de routage doit prendre en considération les changements de la topologie ainsi que les autres caractéristiques des réseaux de véhicules. Par ailleurs, la méthode adoptée dans le routage doit offrir le meilleur acheminement des données au vu des différentes métriques de performance (délai, fiabilité, surcharge).

De nombreux travaux ont été menés pour garantir l'acheminement des messages (couche réseau) dans les réseaux ad hoc mobiles (MANETs). Cependant, compte tenu de la nature très dynamique des réseaux de véhicules, ces protocoles MANETs deviennent inadaptés et sont pénalisés par la forte mobilité des véhicules. Des mécanismes et des protocoles spécifiques doivent donc être utilisés afin d'effectuer un routage efficace et performant dans la partie ad hoc du réseau de véhicules.

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau protocole de routage multi-sauts adapté aux réseaux ad hoc véhiculaires dans un environnement urbain. Le reste du chapitre est organisé comme suit : dans la section 2, nous présentons la problématique du routage dans les réseaux de véhicules. Dans la section 3, nous décrivons les différentes solutions pour le routage dans MANET et VANET et nous illustrons les problèmes liés à ces protocoles. La section 4 décrit le principe de fonctionnement du protocole proposé. La section 5 est dédiée à l'étude des performances de notre approche. Dans la section 6, nous discutons les diverses applications/services de communications inter-véhicules qui requièrent notre solution de routage. La section 7 conclut ce chapitre.

4.2 Problème de routage dans les réseaux de véhicules

Le problème de routage dans les réseaux de véhicules est loin d'être évident. La difficulté réside essentiellement dans l'instabilité des chemins causée par la forte mobilité des noeuds et les fragmentations fréquentes du réseau. En effet, le fait que le réseau soit à connectivité partielle ou intermittente souligne que la gestion de routage doit être différente des approches topologiques utilisées dans les réseaux ad hoc classiques MANETs.

Autre aspect de la problématique est du au fait que le routage géographique de base pose des problèmes dans le cas de communications dans des environnements où il existe des obstacles (bâtiments) et des vides comme c'est le cas dans une ville.

4.3 Panorama des protocoles de routage ad hoc existants

4.3.1 Protocoles de routage pour les MANETs

Avant d'aborder la fonctionnalité du routage dans les réseaux de véhicules, nous allons brièvement rappeler quelques principes et travaux autour du routage dans les réseaux ad hoc mobiles.

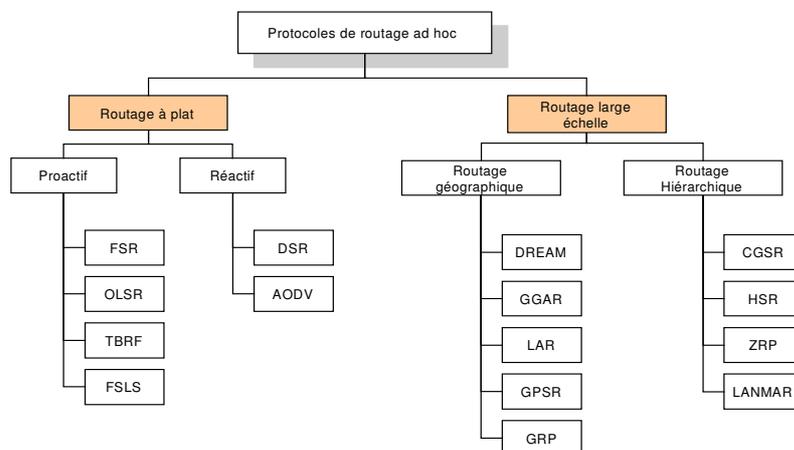


Figure 4.1 : Classification des algorithmes de routage ad hoc.

Comme le montre la figure 4.1, nous distinguons plusieurs familles de protocoles de routage pour réseaux ad hoc dont chacun a sa spécificité :

La première famille de protocoles, le routage plat (*Flat routing*) peut se diviser en deux sous-ensembles : d'un côté, les protocoles proactifs (FSR [58], OLSR [59], TBRPF [60]) et de l'autre, les protocoles réactifs (DSR [61], AODV [62]). Un **protocole proactif** va conserver toutes les

routes possibles pour chaque destination dans le réseau dans une table de routage qu'il construit et qu'il maintient. La route sera donc disponible immédiatement. A l'inverse, les **protocoles réactifs** attendent qu'une route soit demandée pour essayer de la déterminer. Dans ce cas, un délai supplémentaire est nécessaire au début de chaque session pour la recherche du chemin. De manière générale, ces protocoles de routage (proactifs et réactifs) sont bien adaptés aux réseaux ad hoc à étendue faible ou moyenne, mais atteignent leurs limites pour des réseaux ayant un nombre élevé de nœuds.

En parallèle, de nouveaux protocoles appelés protocoles de routage géographiques (*geographical routing*) ou hiérarchiques (*hierarchical routing*) sont développés et conçus pour assurer un routage efficace dans les réseaux à large échelle :

i. Routage hiérarchique : dans un routage hiérarchique, il est question de partitionner le réseau en clusters (ou groupes) pour une meilleure dissémination des informations de routage. Il s'agit en effet d'un routage où les nœuds ont une autorité plus ou moins importante et certains sont responsables d'une certaine zone afin de faciliter le routage. Le clustering consiste à classer les nœuds du réseau d'une manière hiérarchique suivant certains paramètres : adresse, zone géographique, capacités, etc. Un sous ensemble de nœuds est élu, d'une manière distribuée, chacun jouant le rôle de coordinateur local. Une telle approche de routage hiérarchique (ex : CBRP [63]) a pour but de réduire la taille de la table de routage qui est fonction de la structure de clustering utilisée. L'algorithme de clustering pour sa part est basé sur les étapes suivantes : formation (élection) des cluster-heads, communication entre les cluster-heads, et maintenance de ces derniers.

ii Routage géographique : il s'agit d'un routage prenant en compte la position géographique des nœuds. Pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc, il est indispensable que : (i) tous les nœuds possèdent un moyen de localisation : via un système natif comme le GPS, Galiléo, ZigBee [64] ou grâce à un système logiciel, (ii) un nœud source doit connaître la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de localisation tels que GLS (*Greedy Location Service*) [65], QLS (*Quorum-based location service*) [66] ou encore Homezone [67] doit être utilisé.

Parmi les propositions existantes dans la littérature, on distingue deux catégories de protocoles de routage géographiques : celle utilisant l'information de localisation afin d'améliorer en

précision des protocoles déjà existants ("Aide au routage") et les protocoles de routage géographiques.

Dans la première catégorie, le principe est d'ajouter des fonctions supplémentaires aux protocoles existants en vue de les améliorer dans certaines situations. Ces améliorations portent majoritairement sur la réduction du nombre de messages de découverte de route envoyés. Ainsi, l'utilisation des algorithmes de découverte des routes devient plus pertinente à certains endroits du réseau qu'à d'autres. La géolocalisation permettra de délimiter un périmètre de recherche dans lequel le protocole de découverte de routes sera plus efficace. Un exemple d'un tel procédé est le protocole LAR (*Location Aided Routing*) [68], un protocole réactif qui procède d'une manière très similaire au protocole DSR en utilisant un mécanisme de construction de route. La principale différence entre les deux protocoles réside dans le fait que LAR utilise les informations de localisation dans le but de limiter l'inondation des paquets de requête de route à une zone géographique calculée en fonction des mouvements des deux protagonistes de l'échange.

Le principal avantage de la deuxième catégorie d'algorithmes géographiques tels que GGAR [69], GPSR [70] et GRP [71] réside dans sa capacité à trouver la meilleure route géographique possible pour chaque paquet émis, tout en ayant une vue restreinte du réseau ou n'ayant que des informations partielles de localisation. GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) par exemple, utilise la position des nœuds en plus de la destination pour décider du prochain nœud auquel retransmettre le paquet. Par défaut, un nœud GPSR utilise le mode glouton (*greedy*) et retransmet le paquet à son voisin le plus proche de la destination. La connaissance de ses voisins se fait par diffusion périodique des messages *Hello* contenant l'adresse du nœud et sa position (x,y).

Le routage basé sur la localisation est connu pour être très robuste dans le cas des réseaux à large échelle. Il représente un bon candidat pour les réseaux VANET. Quelques travaux comme celui de [72] et [73] l'ont bien démontré. Les auteurs de [72] ont évalué les performances de trois protocoles de routage ad hoc (AODV, DSR, et LAR). Les résultats de simulation ont montré que le routage géographique (LAR) est plus performant en termes de délai de bout en bout et de surcharge du réseau dans un environnement de type IVC. Dans [73], une étude comparative entre GPSR et DSR a été réalisée dans des scénarios de trafic routier. Cette étude a montré que le protocole de routage basé sur la position (GPSR) est plus approprié que le protocole basé sur la topologie (DSR) pour les réseaux VANET.

4.3.2 Protocoles de routage pour VANETs

Différentes solutions pour le routage dans les réseaux VANETs ont été proposées. Parmi celles-ci :

GSR (*Geographic Source Routing*) [74] est un protocole géographique qui combine le routage basé sur la position avec des informations relatives à la topologie des routes pour construire une connaissance adaptée à l'environnement urbain. Selon le protocole GSR, un véhicule source désirant émettre un paquet de données à destination d'un véhicule cible, calcule le chemin de routage le plus court pour atteindre ce véhicule cible, à partir des informations géographiques d'une carte routière. On notera que le chemin de routage en question est calculé dans son intégralité, en utilisant par exemple l'algorithme de *Dijkstra*. A partir du chemin de routage calculé, le véhicule source sélectionne ensuite une séquence d'intersections par lesquelles le paquet de données doit transiter afin d'atteindre le véhicule cible. Cette séquence d'intersections est constituée par un ensemble de points géographiques fixes de passage du paquet de données. Et pour envoyer les messages d'une intersection à une autre, les auteurs proposent d'utiliser une approche gloutonne.

Les mêmes auteurs ont proposé un protocole GPCR (*Greedy, Perimeter Coordinator Routing*) [75] qui est une combinaison du protocole GPSR et l'utilisation de la cartographie des routes. Les auteurs supposent que chaque nœud peut savoir s'il est dans une intersection auquel cas il acquiert le statut de nœud coordonnateur. Ainsi, les messages sont transmis le long de la route en utilisant une approche gloutonne avec une préférence donnée aux nœuds coordonnateurs. Cela signifie qu'en choisissant le prochain nœud relais, un nœud coordonnateur (un nœud au niveau d'une intersection) est préféré à un nœud non-coordonnateur, même s'il n'est pas le plus proche de la destination, et ceci afin d'éviter les obstacles radios (bâtiments, ..).

A-STAR (*Anchor-based Street and Traffic Aware Routing*) [76] est un protocole de routage basé sur la position pour un environnement véhiculaire métropolitain. Il utilise particulièrement les informations sur les itinéraires d'autobus de ville pour identifier une route d'ancre (*anchor route*) avec une connectivité élevée pour l'acheminement des paquets. A-STAR est similaire au protocole GSR en adoptant une approche de routage basée sur l'ancrage (*anchor based*) qui tient compte des caractéristiques des rues. Cependant, contrairement à GSR il calcule les "*anchor paths*" en fonction du trafic (trafic de bus, véhicules, etc...). Un poids est assigné à chaque rue en fonction de sa capacité (grande ou petite rue qui est desservie par un nombre de bus différent).

Les informations de routes fournies par les bus donnent une idée sur la charge de trafic dans chaque rue. Ce qui donne une image de la ville à des moments différents.

VADD (*Vehicle-Assisted Data Delivery*) [80] est un protocole de routage qui prend en considération le contexte des réseaux de véhicules et exploite le mouvement prévisible des véhicules pour décider de retransmettre ou non le message. Il utilise particulièrement les informations sur le trafic routier au niveau d'une route pour estimer le délai mis par un paquet pour parcourir un tel segment. Par conséquent, les paquets seront acheminés le long d'un chemin ayant le plus faible délai de bout en bout.

Le protocole de routage MORA (*MOvement-based Routing Algorithm*) proposé dans [77] exploite la position et la direction de mouvement de véhicules pour adapter les décisions de retransmission au contexte des véhicules et faire face ainsi à la forte mobilité des nœuds et au changement assez fréquent de la topologie. Le protocole MURU (*A MUlti-hop Routing protocol for Urban vehicular ad hoc networks*) [78] est un autre protocole de routage basé sur le mouvement et adapté aux environnements urbains. Les auteurs utilisent une métrique appelée degré de déconnexion attendu (*Expected Disconnexion Degree*) pour évaluer la qualité du chemin. Cette métrique est calculée à partir des informations sur la prédiction de la vitesse et la trajectoire de chaque véhicule. Le protocole HOP [79] (*Conditional Transmissions*) est un protocole de routage adapté à une communication one-to-many. Il utilise une diffusion basée sur les transmissions conditionnelles. La solution proposée ne nécessite pas de connaissance a priori du voisinage, ni des récepteurs. Elle permet la transmission de messages dans une zone géographique donnée en avant ou en arrière de l'émetteur.

4.3.3 Besoin d'un nouveau protocole

Contrairement aux réseaux ad hoc classiques MANETs, le routage dans les réseaux de véhicules constitue un véritable obstacle. La difficulté du routage dans les réseaux VANET réside essentiellement dans l'instabilité des chemins causée par la forte mobilité des nœuds et les fragmentations fréquentes du réseau. En effet, les protocoles proactifs tels que OLSR [59], FSR [58] seront débordés par un changement de topologie très fréquent. A l'inverse, les protocoles réactifs comme DSR [61] et AODV [62] nécessitent un laps de temps pour la recherche d'une route.

Le routage basé sur la localisation semble être un candidat idéal pour les réseaux VANETs pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ce type de routage permet le passage à l'échelle. De plus, il

bénéficie de la disponibilité de récepteurs GPS peu coûteux sur le marché. Ainsi, plusieurs protocoles de routage géographiques ont été proposés ces dernières années à l'instar de GPSR [70] et LAR. [68]. Cependant, le routage géographique de base pose des problèmes dans le cas de communications dans des environnements où il existe des obstacles (bâtiments) et des vides comme c'est le cas dans une ville. GPSR par exemple, utilise une simple approche gloutonne pour acheminer les messages sans prendre en considération la topologie des routes. Par conséquent, plusieurs messages ne vont pas pouvoir atteindre leur destination finale à cause de l'existence des obstacles radios (bâtiments, etc...) dans un environnement urbain. Une adaptation de ces protocoles est donc nécessaire.

Les différentes solutions de routage proposées dans le cadre des réseaux de véhicules ont résolu ce problème en combinant un routage basé sur la localisation avec l'utilisation de la cartographie des routes. En effet, GSR [74] adopte une approche de routage basée sur l'ancre (séquence d'intersections constituée par un ensemble de points géographiques fixes de passage du paquet de données). Cependant, il ne prend pas en compte un facteur important pouvant influencer sur les performances, à savoir l'information sur le trafic routier. En effet, le chemin sélectionné par GSR peut contenir des tronçons de routes où il n'y a pas assez de voitures et par conséquent, plusieurs paquets peuvent être perdus par manque de connectivité. Pour faire face à ce problème, A-STAR [76] utilise particulièrement les informations sur les itinéraires d'autobus de ville pour identifier une route d'ancre (*anchor route*) avec une connectivité élevée pour l'acheminement des paquets. En effet, les auteurs considèrent que les routes prises par les bus sont toujours des artères principales. Cependant, cette supposition n'est pas toujours vraie. Pour sa part, VADD [80] choisit les intersections à faible délai en prenant en compte des paramètres statistiques du trafic routier (vitesse maximale, densité moyenne, etc...). Ces deux protocoles (A-STAR et VADD) prennent donc en compte l'information sur le trafic routier lors du choix du chemin. Néanmoins, cette information est déduite de manière statique en plus de l'utilisation de quelques paramètres statistiques. Les deux approches ne prennent donc pas en compte les variations spatio-temporelles du trafic routier au cours de la journée. Ces variations s'accroissent surtout lorsque la densité du réseau est assez faible.

Un autre problème qu'on peut identifier dans ces protocoles est l'utilisation d'une simple approche gloutonne pour envoyer les paquets tout au long d'une route. En d'autres termes, lors du choix d'un véhicule relais (le véhicule le plus proche de la destination), on ne prend pas en compte la vitesse et le sens de déplacement des voitures, on considère uniquement l'information sur la position géographique des voisins. Mais quand la dynamique augmente, l'information sur

la position, enregistrée à un instant t , aura une durée de vie limitée. Cette imprécision dans les positions peut influencer négativement sur les performances de l'approche (le choix du véhicule relais n'est pas optimal dans le sens où le véhicule sélectionné n'est pas forcément le véhicule le plus proche de la destination à l'instant de l'envoi du paquet).

Par ailleurs, dans les VANETs, le mouvement des véhicules ne peut pas être contrôlé pour assurer le routage. Par contre, le contrôle de la trajectoire peut être utilisé pour améliorer les performances des réseaux ad hoc en général. Le routage basé sur le mouvement (MURU [78] et MORA [77]) ne peut s'appliquer que dans certaines situations alors que, dans d'autres cas, il peut être inefficace. Ainsi, cette approche ne peut pas être une solution à part entière pour les réseaux de véhicules.

Afin de pallier aux problèmes mentionnés ci-dessus, nous proposons un nouveau protocole de routage appelé GyTAR (*improved-Greedy Traffic-Aware Routing*). Ce dernier est adapté à un environnement urbain en adoptant une approche basée sur un choix adéquat des intersections, et utilise une approche gloutonne améliorée afin d'optimiser le choix des nœuds relais pour l'acheminement des données entre deux intersections. Plus précisément, GyTAR est capable de sélectionner des routes à connectivité élevée grâce à la prise en compte des variations spatio-temporelles du trafic routier (via le mécanisme IFTIS présenté dans le chapitre 3). Chaque nœud utilise également une prédiction des déplacements de ses voisins pour pouvoir déterminer à chaque instant le meilleur voisin à utiliser. Notre approche de routage est détaillée dans la section suivante.

4.4 Une solution de routage géographique basée sur les intersections

4.4.1 Hypothèses et préliminaires

Dans GyTAR, on suppose que chaque véhicule participant à la fonction de routage est équipé d'un système de localisation comme le GPS, d'un module Wifi et d'un microprocesseur. Le GPS permet de déterminer la position mais aussi la vitesse et la trajectoire de chaque véhicule. Notons que les années 90 ont vu l'émergence des GPS permanents qui connaissent actuellement une démocratisation et un développement sans précédent. Ces GPSs sont souvent équipés par une cartographie permettant aux véhicules candidats de se localiser dans une ville et de se positionner par rapport aux différentes intersections.

On suppose aussi que chaque véhicule peut déterminer son sens de circulation par rapport à un autre véhicule transitant sur le même tronçon. La solution imaginée met en jeu un calcul vectoriel. On prend un véhicule V1 et un vecteur $\vec{v_1}$ pour sa direction. Idem pour un véhicule V2.

Si $|\vec{v_1}, \vec{v_2}| < \mu$, alors les véhicules sont dans le même sens.

Si $|\vec{v_1}, \vec{v_2} - \Pi| < \mu$, alors les véhicules sont dans le sens opposé.

Par ailleurs, on suppose que chaque véhicule peut déterminer la position de la destination finale, via la cartographie s'il s'agit d'une infrastructure statique et via un système de gestion de localisation (GLS [65], RLS [74], etc.) dans le cas où la destination finale est une voiture mobile.

4.4.2 Description détaillée du protocole

GyTAR est un protocole de routage basé sur la localisation et adapté aux réseaux de véhicules dans un environnement urbain. L'objectif de GyTAR est de router les données de proche en proche en considérant les différents facteurs spécifiques à ce genre d'environnements/réseaux. Pour ce faire, il adopte une approche de routage basée sur les intersections (*anchor based*) qui tient compte pour cela de la structure urbaine en rues croisées. GyTAR comporte deux composantes : (i) la sélection des intersections par lesquelles un paquet doit passer pour atteindre le nœud destination et (ii) une approche gloutonne améliorée pour router les paquets entre deux intersections.

4.4.2.1 Choix dynamique des intersections

Contrairement aux protocoles existants où le véhicule émetteur sélectionne dès le départ une séquence d'intersections permettant d'atteindre la destination finale, GyTAR sélectionne les points d'ancrage "*anchor paths*" dynamiquement (c.-à-d. intersection par intersection). Ce choix progressif des intersections intermédiaires permet :

- (i) de prendre en considération les variations spatio-temporelles du trafic routier et par conséquent, de toujours sélectionner des tronçons de routes à connectivité élevée ;
- (ii) de réduire l'en-tête du paquet et de fixer sa taille étant donné qu'elle comporte toujours les coordonnées d'un seul point ancre (la prochaine intersection destination) ;

- (iii) de mettre à jour l'information concernant la position de la destination finale dans le cas où la cible est une voiture mobile.

Afin de sélectionner la prochaine intersection destination, un véhicule recevant un paquet au niveau d'une intersection commence par déterminer les intersections voisines utilisant la cartographie. Ensuite, il attribue un score à chacune de ces intersections. Ce score prend en compte deux paramètres importants :

- (i) la distance curviligne qui sépare l'intersection candidate de la destination finale. Cette distance est calculée en prenant donc en compte la topologie des routes ;
- (ii) la densité du trafic routier au niveau du tronçon de route entre l'intersection courante et l'intersection candidate.

Ainsi, l'intersection qui aura le score le plus élevé (et par conséquent sera choisie comme prochaine intersection destination) est l'intersection qui se trouve la plus proche de la destination finale et pour laquelle la densité du trafic est suffisamment élevée pour l'atteindre.

La figure 4.2 nous montre un exemple de sélection d'une intersection intermédiaire. Dans ce scénario, on suppose que le véhicule (S) localisé au niveau de l'intersection I₁ a des paquets de données à envoyer vers la cible finale (C). Pour ce faire, il commence par déterminer les intersections voisines (I₁, I₂, I₃) en utilisant la cartographie. Pour chaque intersection I_i, il calcule un score S_i en prenant en compte les deux paramètres distance curviligne D_i et densité du trafic routier T_i (Score (S_i) = $\alpha \times f(D_i) + \beta \times g(T_i)$). Dans ce cas de figure, il est clair que l'intersection I₂ aura le score le plus élevé étant donné qu'elle est la plus proche de la destination finale (C) et que la densité du trafic entre l'intersection I₁ et l'intersection I₂ est assez élevée. Par conséquent, I₂ sera choisie comme prochain point géographique fixe (ancrage) de passage du paquet de données.

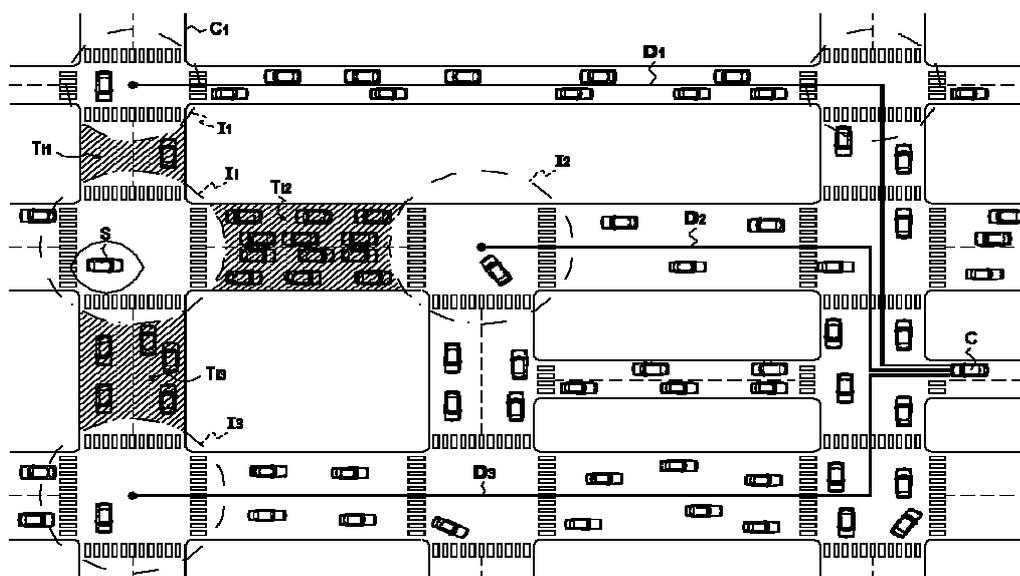


Figure 4.2 : Sélection des intersections dans GyTAR.

Plus précisément, le score d'une intersection est calculé comme suit :

$$\text{Score (J)} = \alpha \times f(D_j) + \beta \times g(I_j) = \alpha \times [1 - D_p] + \beta \times \left[\min \left(\frac{1}{\sigma+1} x \frac{N_{avg}}{N_{con}}, 1 \right) \right] \quad (4.1)$$

Avec les notations suivantes :

- I : intersection courante,
- J : intersection candidate,
- Dj (respectivement Di) : les distances curvilignes entre J (respectivement I) et la destination,
- Dp = Dj/Di (Dp détermine la proximité de l'intersection candidate par rapport à la destination),
- Nv : le nombre total de véhicules entre I et J,
- Nc : nombre de cellules⁷ entre I et J,

⁷ La taille de la cellule correspond au rayon de transmission radio des véhicules.

$$- N_{avg}: \text{nombre moyen des véhicules par cellule } (N_{avg} = \frac{1}{Nc} \times \sum_{i=1}^{Nc} Ni), \quad (4.2)$$

- N_{con} : constante représentant le degré de connectivité idéal que l'on pourrait avoir dans une cellule,

- σ : l'écart type qui mesure la dispersion des densités par cellule autour de la moyenne N_{avg} ,

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{Nc} \times \sum_{i=1}^{Nc} (Ni - N_{avg})^2 \right)} \quad (4.3)$$

- α et β : les poids associés à la distance et à la densité du trafic routier dans le calcul du score avec $\alpha + \beta = 1$.

Dans le reste de cette partie, une attention particulière sera accordée à cette formule de calcul de score, et plus précisément à la partie relative à la densité du trafic $g(T_j)$ où on voit apparaître les paramètres N_{avg} , σ et N_{con} .

- Choix du paramètre N_{con}

Pour calculer le score de densité $g(T_j)$, le tronçon de route entre les intersections I et J est divisé en Nc cellules. La constante (N_{con}) représente le degré de connectivité idéal que nous pouvons avoir au sein d'une cellule. En d'autres termes, N_{con} représente le nombre minimal de véhicules par cellule nécessaire pour assurer une bonne connectivité dans un tronçon de route de longueur L . L'objectif principal de cette partie est de déterminer la valeur de cette constante.

Si on se place au bord d'une voie et que l'on mesure l'intervalle entre les véhicules (c'est-à-dire le temps qui sépare l'arrivée de deux véhicules successifs), on s'aperçoit que cette variable est distribuée selon une loi exponentielle [81]. Si on suppose que les voitures circulent avec une vitesse constante, on peut déduire facilement que la distance inter-véhicules suit aussi une loi exponentielle. Ainsi, la distribution de la distance d entre des véhicules est exprimée par la distribution exponentielle suivante :

$$f(d) = \lambda \exp(-\lambda.d) \quad (4.4)$$

où λ représente la densité du trafic exprimé en [véhicules/km]

Notons R la portée radio d'un véhicule, et ρ le nombre moyen de véhicules par portée radio. Le paramètre λ de la distribution exponentielle pour une distance d est choisi égal à la densité par portée radio ($\lambda = \rho$). Ainsi, la probabilité $F(R)$ pour qu'un véhicule se trouve dans la portée d'un autre pour pouvoir communiquer est :

$$F(R) = P(d < R) = \int_0^R f(d) = 1 - \exp(-\rho \cdot R) \quad (4.5)$$

Considérons maintenant m véhicules placés sur une voie de longueur L . Ces m voitures représentent $m-1$ segments qui correspondent en fait aux espacements inter-véhicules. La probabilité P qu'il y ait une connectivité radio continue tout le long de la voie est égale à la probabilité pour que ces m véhicules se déplacent tout au long de la voie en gardant une distance inter-véhicule d inférieure à la portée radio R . Ceci qui peut être calculé comme suit :

$$P(\rho, R, m) = \prod_1^{m-1} F(R) = [1 - \exp(-\rho \cdot R)]^m \quad (4.6)$$

où m représente la valeur entière de $[L/R]$.

La figure 4.3 représente la probabilité P d'avoir une connectivité radio continue en fonction de ρ (nombre moyen de véhicules par portée radio), et ceci pour des tronçons de routes de longueurs différentes. La portée radio d'un véhicule est fixée à 250m. Conformément à la figure 4.3, quand la densité ρ augmente, la probabilité P augmente aussi pour atteindre presque 99% de chance d'avoir une connectivité totale quand la densité est ρ dépasse les 7 véhicules par portée radio. Par exemple, pour une route de longueur $L = 4 \cdot R$ (1000m), nous avons une bonne connectivité (le $P_c = 90\%$) pour une densité $\rho = 4 \text{ veh/R}$. De là, nous pouvons considérer que N_{con} sera égale à 4 pour ce cas de figure. De même, quand $L = 3 \cdot R$, $N_{\text{con}} = 3$ est suffisant. Tandis que lorsque $L = 10 \cdot R$, nous avons besoin de 5 véhicules par cellule pour assurer une bonne connectivité. Ainsi, les valeurs de N_{con} peuvent être calculées en fonction de la longueur de la route en utilisant l'équation 4.6.

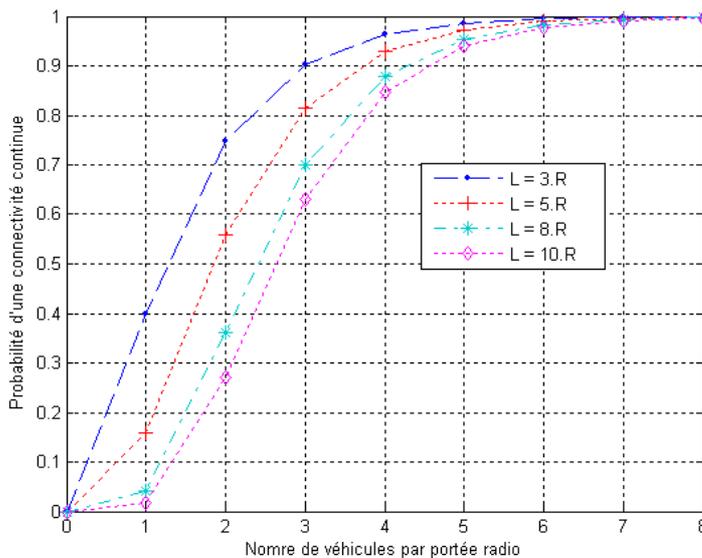


Figure 4.3 : Probabilité d'une connectivité continue.

– Détermination des paramètres N_{avg} et σ utilisant IFTIS

Grâce au mécanisme IFTIS décrit dans le chapitre précédent, chaque véhicule au niveau d'une intersection reçoit des paquets d'agrégation CDP contenant les informations de densité de trafic dernièrement reçues à partir des voies de circulation voisines. En effet, chaque paquet CDP caractérise l'état du trafic d'une voie en fournissant l'intégralité des données de densité de trafic local de chaque cellule (c'est-à-dire le nombre de véhicules $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$). Ainsi, suite à l'analyse d'un paquet CDP, un véhicule participant au protocole GyTAR utilise ce dénombrement des groupes de véhicules associés à chaque cellule pour calculer N_{avg} (nombre moyen de véhicules par cellule) en utilisant la formule 4.2 et σ (l'écart type qui mesure la dispersion des densités par cellule autour de la moyenne N_{avg}) en utilisant la formule 4.3.

La tableau 4-1 ci-après nous montre un exemple d'analyse d'un paquet CDP complet afin de calculer le score densité $g(I_j)$ d'une intersection J . Ce paquet caractérise la densité de trafic du tronçon de route de la figure 4.4 (une voie de circulation située entre les deux intersections I_n et I_{n+1} et composée des 4 cellules (X1, X2, X3, et X4).

Tableau 4-1 : Exemple de calcul du score densité

	Nombre de véhicules total	(N_1, N_2, N_3, N_4)	(N_{avg}, σ)	Score Densité
Scénario 1	8	(2, 1, 3, 2)	(2, 0,7)	0,29
Scénario 2	20	(3; 3; 6; 8)	(5; 2,1)	0,40
Scénario 3	20	(5; 4; 6; 5)	(5; 1,0)	0,62

Dans le premier scénario, le nombre total de véhicules qui circulent tout au long du tronçon est égal à 8, ce qui correspond à une densité faible de la voie. C'est pourquoi le score de densité calculé est petit. Dans les deux autres scénarios, nous avons augmenté la densité du tronçon (20 véhicules). Ceci s'est naturellement traduit par l'obtention de scores plus élevés. Par ailleurs, nous notons que le score du scénario 3 est plus élevé que celui du dernier scénario bien que le nombre total de véhicules soit le même. Nous expliquons ceci par la dispersion des densités par cellule autour de la moyenne. En effet, dans le scénario 2, les deux premières cellules sont peu denses et les deux dernières sont très denses (c'est le cas de véhicules groupés devant un feu de signalisation par exemple). Par conséquent, l'écart-type correspondant est grand; tandis que dans le scénario 3, les quatre cellules ont presque le même nombre de véhicules. L'écart-type est alors petit et le score correspondant est grand.

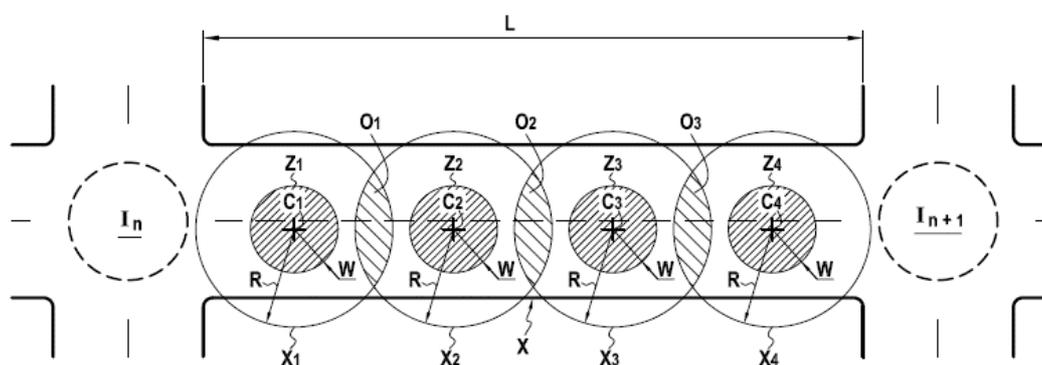


Figure 4.4 : Calcul du score densité d'une voie de circulation.

Nous venons de décrire dans cette partie le mécanisme de sélection des intersections dans GyTAR. En adoptant cette approche dynamique de choix des intersections intermédiaires, qui prend en compte aussi bien la distance vers la destination finale que le trafic routier et son constante évolution dans le temps, GyTAR est capable de sélectionner des routes robustes afin d'y injecter les paquets de données. Ceci étant fait, la prochaine étape consiste à faire acheminer les paquets de données entre chaque couple d'intersections. L'approche utilisée pour envoyer les paquets entre deux intersections est décrite dans la section suivante.

4.4.2.2 Approche gloutonne améliorée

4.4.2.2.1 Généralités

Dans un protocole de routage géographique basé sur une approche gloutonne, un nœud est supposé connaître la position de ses voisins et celle du nœud destination. La connaissance du voisinage est périodiquement mise à jour à l'aide de messages *Hello* échangés entre nœuds voisins.

Dans une approche gloutonne géographique (*greedy geographic forwarding*), le nœud le plus proche de la destination, parmi les nœuds voisins, est choisi comme prochain saut. Comme métrique de proximité, il est possible d'utiliser la distance euclidienne, ou la projection sur une ligne entre le nœud courant et la destination.

4.4.2.2.2 Approche gloutonne améliorée de GyTAR

Dans GyTAR, chaque véhicule maintient une table de voisinage dans laquelle il sauvegarde la position géographique de ses voisins, leur vitesse et leur sens de circulation. Cette table est mise à jour régulièrement à l'aide des messages *Hello* échangés périodiquement entre tous les véhicules. Le tableau 4-2 ci-dessous illustre un exemple de table de voisinage d'un véhicule participant au protocole de routage GyTAR.

Tableau 4-2: Table de voisinage d'un véhicule

Voisin (i)	Instant de mise à jour	Position géographique (x, y)	Vitesse (km/h)	Sens de déplacement (même sens - 1/ sens inverse - 0)
Véhicule (1)	t_1	(30.0, 250.0)	46 km/h	1
Véhicule (2)	t_2	(120.0, 10.0)	30 km/h	0
....

L'approche gloutonne améliorée de GyTAR utilise cette table de voisinage enrichie pour router les paquets de données entre deux intersections. En effet, une fois la prochaine intersection sélectionnée, le véhicule porteur d'un paquet cherche à le relayer à un véhicule voisin plus proche de l'intersection sélectionnée que lui-même. Pour ce faire, il commence par inférer/estimer la position courante de chacun de ses voisins à partir de (i) la vitesse, (ii) le sens de circulation, et (iii) l'ancienne position géographique enregistrée dans sa table de voisinage. Ainsi, il aura l'information sur la position courante de tous ses voisins. Il peut ensuite sélectionner parmi tous ses voisins, le véhicule le plus proche de la prochaine intersection à l'instant de l'envoi.

La figure 4.5 montre un exemple d'acheminement d'un paquet P de données par l'intermédiaire de véhicules situés entre deux intersections successives, selon l'approche gloutonne améliorée de GyTAR.

La figure 4.5 (a) représente une voie V de circulation entre deux intersections consécutives notées respectivement I_n et I_{n+1} à un instant donné N1. Dans cet exemple, nous considérons qu'un véhicule porteur R0 du paquet P de données, souhaite relayer ce dernier vers l'intersection de destination I_{n+1} . Comme illustré sur la figure, quatre véhicules (R1, R2, R3, R4) sont dans la portée radio du véhicule porteur R0. On suppose qu'à l'instant N1, les véhicules R1 et R2 se déplacent dans le même sens de circulation que le véhicule R0 (la vitesse de déplacement de R1 est supérieure à celle de R2) alors que les véhicules R3 et R4 se déplacent dans un sens de circulation opposé à celui du véhicule porteur R0.

La figure 4.5 (b) représente la même voie V de circulation que celle représentée à la figure 4.5 (a), mais à un instant ultérieur noté N2 (tel que $N2 > N1$). Cette nouvelle configuration est obtenue suite à la prédiction de la position courante des véhicules voisins à partir des informations stockées dans la table de voisinage du véhicule porteur R0. Ainsi, ce dernier transfère le paquet P de données au premier véhicule R1 étant donné qu'il estime qu'à l'instant courant N2, le premier véhicule R1 est celui dont la position est la plus proche de l'intersection de destination I_{n+1} , comme illustré sur la figure 4.5 (b).

Toutefois, on notera que sans cette étape de prédiction qui prend en compte notamment la vitesse et le sens de déplacement des véhicules voisins, le véhicule porteur R0 aurait choisi de transférer son paquet P au véhicule R4 étant donné qu'à l'instant N1, le véhicule le plus proche de l'intersection de destination I_{n+1} est le véhicule R4.

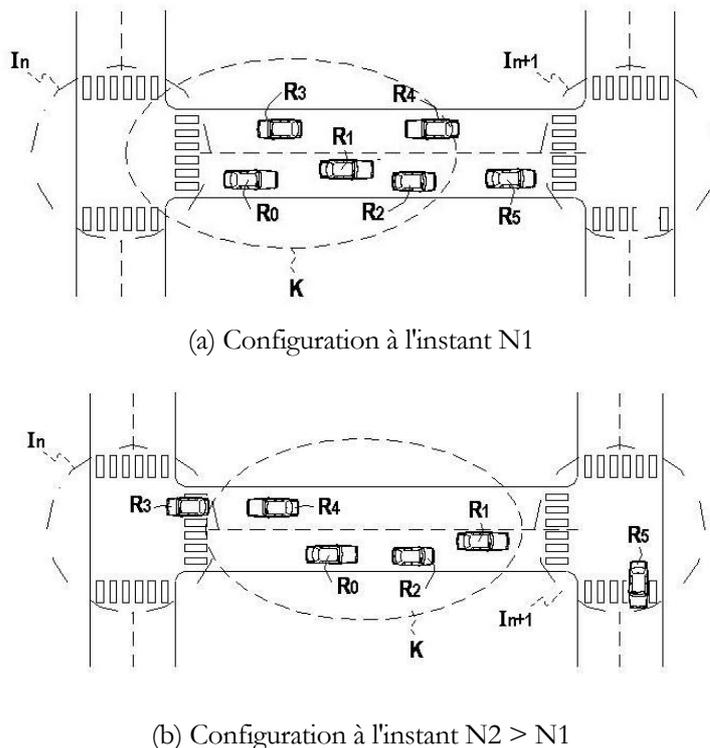


Figure 4.5 : Envoi des données entre deux intersections utilisant une approche gloutonne améliorée.

De manière avantageuse, cette approche gloutonne améliorée permet de choisir les bons candidats pour relayer les paquets de données entre deux intersections successives. D'un côté, elle permet de minimiser le nombre de sauts pour atteindre une intersection destination. D'un autre côté, elle permet de gagner en termes de surcharge de réseaux puisqu'il n'y a pas un besoin d'augmenter la fréquence des messages *Hello* pour avoir une position précise des voisins⁸.

Toutefois, cette stratégie de relais peut échouer dans le cas particulier où aucun véhicule voisin du véhicule porteur n'est plus proche de l'intersection cible que le véhicule porteur lui-même. Cette situation est dénommée « *optimum local* » et nécessite une solution de recouvrement.

4.4.2.3 Solution de recouvrement local

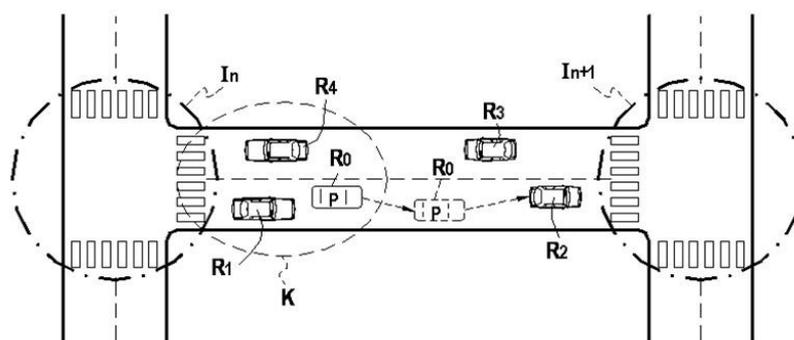
La solution de recouvrement local de GyTAR est basée sur une approche dite "*Carry and forward*" [82]. Elle consiste à garder⁹ le paquet au niveau du véhicule lui-même en exploitant son mouvement. Ainsi, le paquet sera transporté par le véhicule jusqu'à ce qu'il rencontre un nœud plus proche de la destination ou qu'il atteigne lui-même l'intersection en question. La figure 4.6 illustre un exemple de mise en œuvre de la stratégie de recouvrement local.

⁸ La position des voisins est inférée à partir de leur vitesse, leur direction et leur dernière position connue.

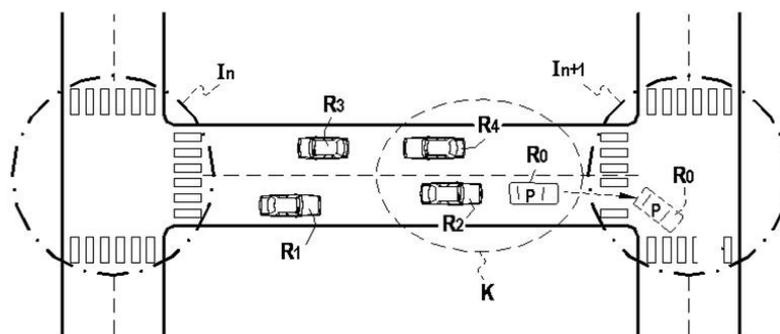
⁹ Le paquet est sauvegardé au niveau d'un buffer pendant une durée bien déterminée suite à laquelle il sera perdu.

L'exemple de la figure 4.6 (a) illustre le cas où, à l'instant $N1$, le véhicule porteur $R0$ cherchant à relayer son paquet P ne trouve aucun véhicule voisin se déplaçant entre le véhicule porteur $R0$ et l'intersection de destination I_{n+1} . Dans ce cas, on utilise une première variante de la solution de recouvrement précitée, selon laquelle le véhicule porteur $R0$ porte le paquet P jusqu'à ce qu'un véhicule adéquat entre dans son domaine de portée radio, de sorte que le paquet P puisse lui être transféré.

L'exemple de la figure 4.6 (b) illustre la deuxième variante de la solution de recouvrement locale de GyTAR. Cette solution consiste à faire porter le paquet P par le véhicule porteur $R0$ jusqu'au niveau de l'intersection de destination I_{n+1} .



(a) Le véhicule porteur ($R0$) porte le paquet jusqu'à ce qu'un véhicule adéquat entre dans son domaine de portée radio.



(b) Le véhicule porteur ($R0$) porte le paquet jusqu'à la prochaine intersection.

Figure 4.6 : Solution de recouvrement local de GyTAR.

4.5 Evaluation des performances

Cette section couvre l'étude des performances du protocole de routage GyTAR. Pour cela, un ensemble de simulations est réalisé en utilisant l'environnement de simulation décrit dans la section 5 du chapitre 3. La première série de simulations effectuées concerne l'étude de la sensibilité de GyTAR par rapport aux paramètres α et β . Elle est suivie par une étude comparative des performances de deux variantes de GyTAR avec deux autres protocoles de routage (GSR et LAR).

4.5.1 Paramètres de simulation

Pour étudier les performances de GYTAR, nous avons créé un environnement urbain proche de la réalité, d'une surface de 2500 x 2000 m², composé de 9 intersections et 23 routes bidirectionnelles (voir figure 4.7). Nous avons utilisé l'outil VanetMobiSim¹⁰ [45] pour générer le mouvement des nœuds. Les positions de nœuds sont alors introduites dans le simulateur QualNet [44].

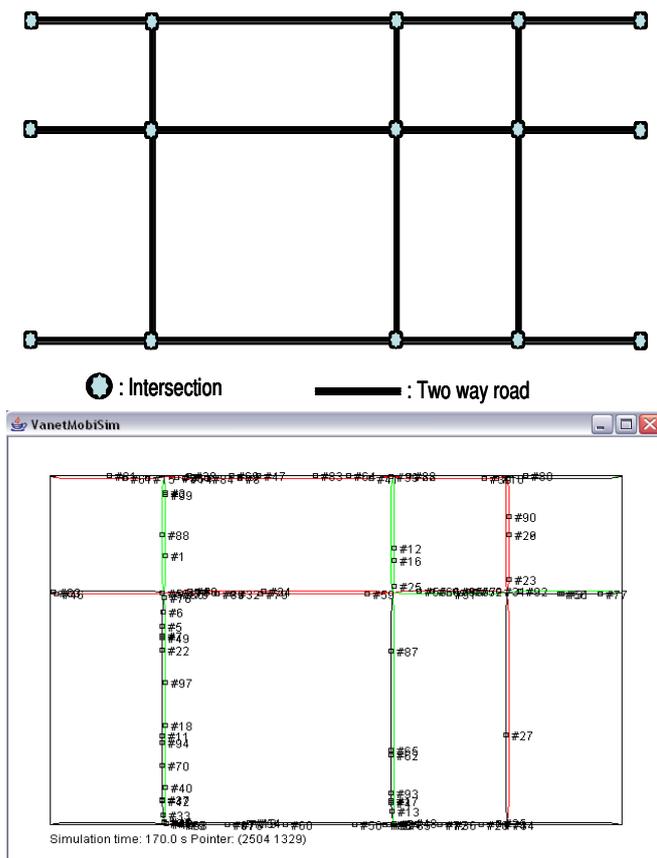


Figure 4.7 : Scénario de simulation.

¹⁰ Modèle de mobilité réaliste pour les réseaux de véhicules, présenté dans la section 4 du chapitre 1

Chaque véhicule participant au scénario a une portée de 266m et se déplace avec une vitesse moyenne de 30 à 50 km/h. Parmi tous les véhicules, on sélectionne 15 paires (source/destination) qui vont s'échanger un flux CBR (*Constant Bit Rate*) avec des paquets de taille 512 octets. Les simulations ont été réalisées pour un réseau 802.11b à 2 Mb/s. On a choisi comme modèle de propagation le modèle de réflexion "*Two-Ray Ground*" qui prend en compte le chemin direct et la réflexion du sol. On a lancé les simulations une dizaine de fois, chacune dure 250s. Chaque point représenté sur une courbe correspond donc à la moyenne obtenue sur 10 simulations.

Au cours de ces simulations, on a fait varier le nombre total de véhicules : (100, 150, 200, 250, 300, 350) et le délai inter-paquets : (0.1 ; 0.3 ; 0.5 ; 0.7 ; 0.9 secondes) afin d'augmenter graduellement la densité et la charge du réseau respectivement. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des paramètres de simulation utilisés.

Tableau 4-3 : Paramètres de simulation

SIMULATION / SCENARIO		MAC / ROUTAGE	
Temps de simulation	250s	Protocole MAC	802.11 DCF
Taille du terrain de simulation	2500 x 2000 m ²	Modèle de propagation	Two-Ray ground reflection
Modèle de mobilité	VanetMobiSim [45]	Portée radio	~266 m
Nombre d'intersections	9	Modèle de trafic	15 CBR connections
Nombre de routes	23	Débit des sources CBR	0.1 – 1 p/s
Nombre de véhicules	100-350	Capacité du canal	2Mbps
Vitesse des véhicules (ville)	30-50±5 Km/h	Taille des paquets de données	512 octets

Nous présentons, dans ce qui suit, les résultats de simulations ainsi que leurs interprétations.

4.5.2 Résultats des simulations et analyse des performances

Les mesures effectuées dans nos simulations sont les suivantes :

- le taux de délivrance des paquets défini comme le nombre de paquets reçus divisé par le nombre de paquets envoyés ;
- le délai de bout en bout ;
- la surcharge du routage défini comme étant le rapport entre le nombre total d'octets des messages de contrôle et la somme de la quantité des données reçus + les paquets de

$$\text{contrôle. (surcharge} = \frac{\sum \text{messages de contrôle}}{\sum (\text{paquets de données reçues} + \text{messages de contrôle})}$$

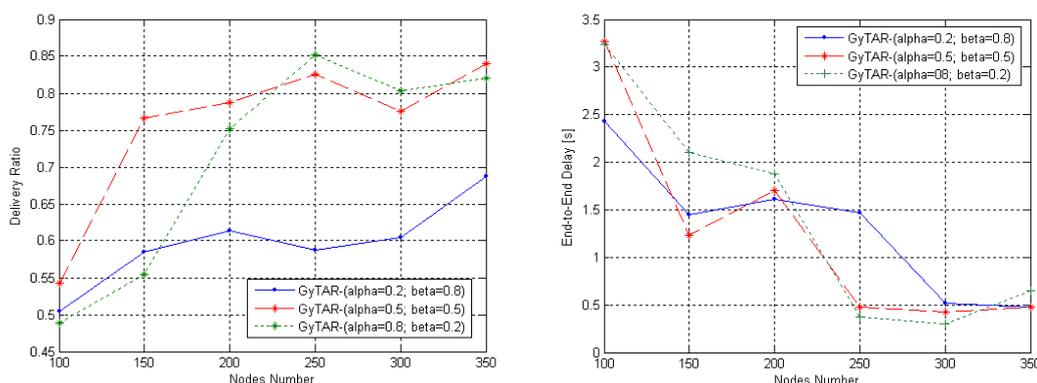
4.5.2.1 Sensibilité des paramètres α et β

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de la sensibilité de GyTAR par rapport aux paramètres α et β . Pour ce faire, nous avons fait varier ces deux facteurs afin de déterminer le poids qu'on doit accorder à la distance et au trafic routier lors de la sélection des intersections. En effet, ces deux paramètres représentent des facteurs de correction, permettant d'attribuer un poids propre à chacune des deux composantes du score d'une intersection I ($\text{Score}(I) = \alpha \times f(D_i) + \beta \times g(T_i)$) (cf. formule 4.1 de la section précédente). Par exemple, si l'on souhaite accorder une plus grande importance au trafic routier qu'à la distance, on choisira une valeur de α et de β telles que $\alpha < \beta$. L'objectif de cette première série de simulations est donc d'analyser les performances de GyTAR en termes de taux de délivrance et délai de bout-en-bout pour différentes valeurs du couple $(\alpha ; \beta)$.

La figure 4.8 représente le taux de délivrance de paquets et le délai de bout en bout en fonction de la densité du réseau, c'est-à-dire le nombre total de véhicules, et ceci pour les différents paramétrages de GyTAR $[(\alpha=0.2;\beta=0.8); (\alpha=0.5;\beta=0.5)$ et $(\alpha=0.8;\beta=0.2)]$. Nous observons que, d'une manière générale, les performances (taux de délivrance et délai) s'améliorent en augmentant la densité du réseau. Nous expliquons ceci par le fait que la connectivité au niveau des routes s'améliore en augmentant le nombre de véhicules qui y circulent. Par conséquent, il y aura plus de paquets qui atteindront leur destination finale avec un délai faible.

Par ailleurs, la variante de GyTAR qui favorise la distance $(\alpha=0.8;\beta=0.2)$ offre des bonnes performances quand le réseau est assez dense (nombre de véhicules entre 200 et 300). Tandis que la variante de GyTAR favorisant la densité montre de meilleurs résultats en termes de taux de délivrance et délai de bout en bout pour des densités faibles (nombre de véhicules entre 100 et 200). En effet, quand le réseau est dense, la majorité des routes ont une bonne connectivité. Par conséquent, il est plus judicieux de favoriser la distance afin de sélectionner les intersections (points d'ancrage) les plus proches de la destination et minimiser ainsi le délai de bout en bout. En revanche, lorsqu'il y a manque de connectivité dans plusieurs tronçons de route (réseau peu dense), on a intérêt à avantager la densité afin de trouver plus de véhicules pour relayer les paquets.

Nous noterons enfin que la variante de GyTAR pour laquelle $\alpha = 0.5$ et $\beta = 0.5$ donne les meilleurs résultats en termes de taux de délivrance et délai de bout en bout pour la plupart des cas de densités considérés. En effet, donner le même poids à la distance et à la densité semble être un bon compromis quelle que soit la densité du réseau.



(a) Taux de livraison (b) Délai de bout en bout

Taux de transmission (5 packets / second)

Figure 4.8 : (a)Taux de livraison et (b) Délai de bout en bout vs Densité du réseau.

Le reste de cette section compare les performances de GyTAR avec deux autres protocoles de routage (GSR et LAR). Suite aux résultats obtenus dans cette section, les valeurs des paramètres (α ; β) sont fixés à (0.5;0.5).

4.5.2.2 Performances de GyTAR – Comparaison avec d'autres protocoles

Afin d'évaluer les performances de GyTAR, nous avons implémenté deux versions : B-GyTAR (GyTAR de base sans l'approche de recouvrement local : le nœud détruit instantanément le paquet lorsqu'aucun de ses voisins n'est plus proche que lui de l'intersection destination), et GyTAR avec la méthode de recouvrement local. Nous avons comparé B-GYTAR et GyTAR aux protocoles LAR [68] et notre propre implémentation¹¹ de GSR [74]. Nous présentons, dans ce qui suit, les résultats de simulations ainsi que leurs interprétations.

4.5.2.2.1 Le taux de livraison

Dans cette partie, nous comparons le taux de livraison des quatre protocoles (GyTAR, B-GyTAR, GSR et LAR). La figure 4.9 (a) montre que le taux de livraison de paquets du protocole GyTAR est supérieur à celui des autres protocoles pour la plupart des taux de transmission considérés. En effet, à partir d'un délai inter-paquet = 0.3 secondes, notre proposition offre de meilleurs résultats. En outre, la figure 4.9 (b) montre que la courbe de GyTAR est au dessus des autres courbes aussi bien pour des densités¹² faibles (100 véhicules) que pour des densités fortes (350 véhicules). Par exemple, pour une densité de 200 véhicules,

¹¹ Aucune implémentation de GSR n'est disponible.

¹² Nombre de véhicules déployés sur la zone de simulation

nous remarquons que GyTAR mène à une amélioration relative des performances de 20% par rapport à GSR. Nous expliquons ceci par la manière avec laquelle est choisi le chemin par lequel doivent passer les paquets de données dans les deux protocoles pour atteindre leur destination finale : dans GyTAR, le chemin est établi progressivement en prenant en compte les variations du trafic routier sur les routes. Par conséquent, les paquets de données passent souvent par des routes où il y a une bonne connectivité. Tandis que dans GSR, le chemin complet est établi dès le départ par la source sans considérer la densité des routes, et donc sans aucune garantie d'avoir une bonne connectivité sur tout le chemin. Par conséquent, certains paquets de données ne peuvent pas atteindre leur destination en raison d'un manque de connectivité sur certaines sections de la route.

En ce qui concerne LAR, son mécanisme de découverte préalable de routes le rend très sensible aux partitionnements de réseaux et aux changements de topologie qui sont très fréquents dans les réseaux véhicules. Ceci explique les mauvaises performances de LAR par rapport à celles de GyTAR.

La comparaison des performances de GyTAR et B-GyTAR montrent que le mécanisme de recouvrement local permet une amélioration du taux de délivrance des paquets. Cette amélioration atteint 20% lorsque la densité du réseau est faible (100 véhicules).

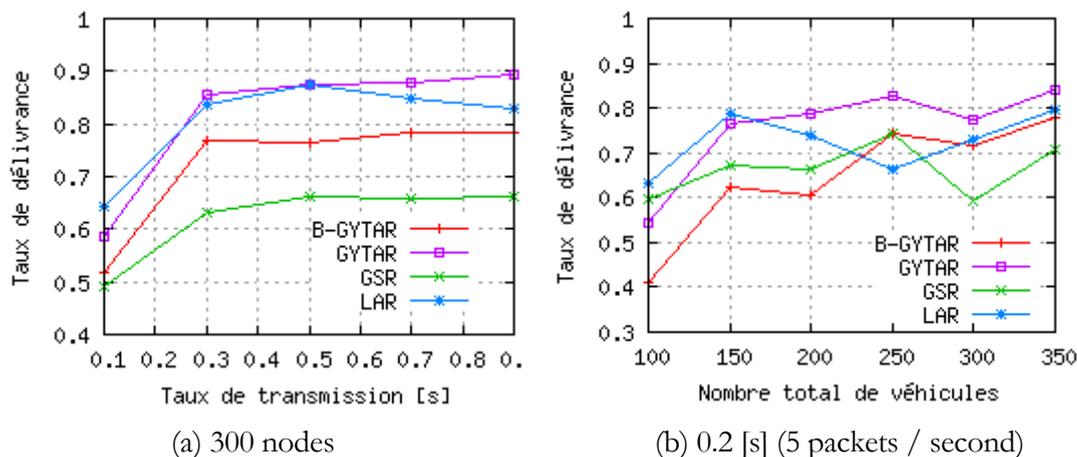


Figure 4.9 : Taux de délivrance vs (a) Taux de transmission et (b) Densité du réseau.

4.5.2.2.2 Le délai de bout en bout

Dans cette partie, nous nous intéressons aux performances des protocoles étudiés en termes de délai de bout en bout.

La figure 4.10 nous montre que le délai de bout en bout est moindre dans GyTAR et B-GyTAR par rapport à LAR et GSR aussi bien en changeant le taux de transmission (figure 4.10 (a)) qu'en augmentant la densité du réseau (figure 4.10 (b)). Ceci est dû, non seulement à la bonne connectivité des routes par lesquelles passent les paquets de données dans GyTAR, mais aussi à l'utilisation d'une approche gloutonne améliorée laquelle permet de réduire le nombre de sauts par un choix adéquat des véhicules relais. En effet, le protocole de routage géographique LAR souffre de délais assez importants par rapport à ceux de GyTAR parce que LAR utilise un mécanisme de découverte de route de bout en bout qui engendre des délais supplémentaires tandis que dans GyTAR, la route est découverte progressivement.

Par ailleurs, le délai de bout en bout de GSR est supérieur à celui de GyTAR parce que GSR rencontre plus souvent les situations de recouvrement local dans les tronçons de routes à faible densité. Par conséquent, il souffre de délais additionnels de stockage dans les files d'attente lorsque le paquet est transporté par le véhicule. Nous noterons aussi que les paquets qui bénéficient de la stratégie de recouvrement local dans GyTAR allongent la moyenne des délais de bout en bout. Ainsi, B-GyTAR donne de meilleurs résultats en termes de délai de bout en bout par rapport à GyTAR¹³. Ce gain est par contre obtenu au prix d'un taux de perte de paquets plus important.

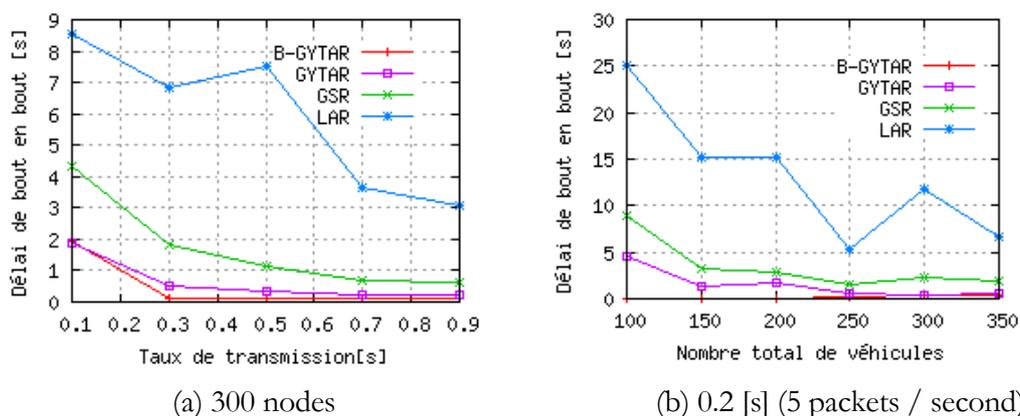


Figure 4.10 : Délai de bout en bout vs (a) Taux de transmission et (b) Densité du réseau.

¹³ GyTAR souffre de délais additionnels de stockage dans les files d'attente lors d'un recouvrement local.

4.5.2.2.3 La surcharge du routage

La figure 4.11 représente la surcharge de routage générée par les quatre protocoles en fonction du taux de transmission et de la densité du réseau. Nous noterons qu'avec GyTAR, on obtient de bonnes performances en termes de taux de délivrance et délai de bout en bout sans pour autant augmenter la surcharge des messages de contrôle. En effet, GyTAR, qui n'utilise que les messages *Hello* pour la découverte de voisinage et les messages CDP pour l'estimation du trafic routier, donne de meilleurs résultats que LAR. Ce dernier qui est un protocole réactif utilise plus de messages de contrôle (*Route Request - RREQ*, *Route Reply - RREP*, *Route Error - RERR*) pour la recherche et le maintien de routes dans un réseau où les ruptures de liens sont fréquents. GSR utilise uniquement les paquets *Hello* comme messages de contrôle. Cependant, la charge correspondante dépasse celle générée par GyTAR. Ceci est dû au mécanisme d'inférence des positions des véhicules utilisés par GyTAR qui fait que ce dernier nécessite une fréquence moins élevée d'envoi de paquets *Hello*. Cette fréquence est 3 fois moindre par rapport à celle recommandée pour GSR.

Notons enfin que la charge de routage générée par les trois protocoles (GyTAR, B-GyTAR et GSR) reste pratiquement stable en variant le taux de transmission et augmente en augmentant le nombre total de véhicules. Nous expliquons ceci par la nature des messages de contrôle utilisés par ces protocoles à savoir des messages *Hello* pour la découverte de voisinage qui augmentent en augmentant le nombre de véhicules déployés.

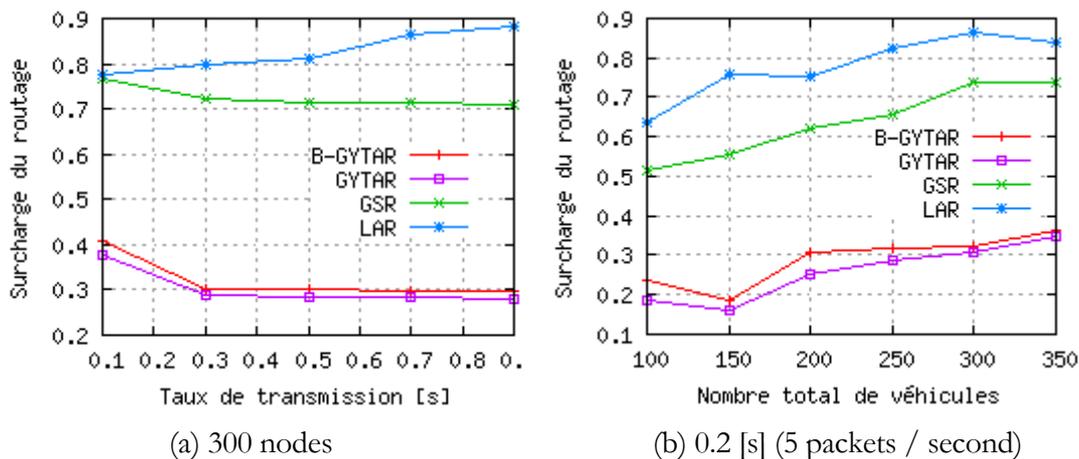


Figure 4.11 : Surcharge du routage vs (a) Taux de transmission et (b) Densité du réseau.

4.6 Discussion

GyTAR est un protocole de routage multi-sauts adapté aux réseaux véhiculaires dans un environnement urbain. Il permet de répondre aux besoins des applications des réseaux de véhicules qui nécessitent l'établissement d'une communication point à point (unicast). En effet, GyTAR vise des services qui, contrairement aux applications de sécurité routière, tolèrent un certain délai lors de l'envoi des données entre la source et la cible. D'un côté, on trouve des services où une voiture a besoin de communiquer avec une borne fixe pour récupérer et/ou fournir des informations utiles aux automobilistes tels que le nombre de places libres dans un parking, des informations touristiques, des informations sur le prix du carburant, la météo, etc. On peut citer également l'accès à Internet via une borne wifi, le téléchargement de la vidéo ou de la musique, etc. D'un autre côté, GyTAR pourrait être utile pour établir une connexion entre deux voitures mobiles pour faciliter par exemple la communication entre deux véhicules qui se suivent, ou encore des jeux distribués entre les voyageurs, du chat, transfert de fichiers, etc. Certaines de ces applications rendraient la vie plus agréable sur nos routes alors que les autres pourraient indirectement contribuer à les rendre plus sûres en agissant sur le comportement des conducteurs (réduction du temps passé sur les routes notamment).

4.7 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouveau protocole de routage pour les réseaux de véhicules appelé GyTAR. GyTAR est un protocole de routage géographique qui tire partie des caractéristiques des voies urbaines et qui intègre le mécanisme d'estimation de densité de trafic IFTIS pour le routage des paquets.

Le protocole proposé adopte une approche progressive de choix des intersections intermédiaires. Une approche qui prend en compte aussi bien la distance vers la destination finale que le trafic routier et sa constante évolution dans le temps. Ainsi, GyTAR est capable de sélectionner des routes robustes ayant une connectivité élevée, afin d'y injecter les paquets de données. Par ailleurs, GyTAR utilise une approche gloutonne améliorée pour relayer les paquets de données entre deux intersections successives. Outre le gain en termes de surcharge de réseau, cette approche permet de minimiser le nombre de sauts pour atteindre une intersection destination.

Les résultats de simulations ont montré que, par rapport à d'autres protocoles de routage de référence (LAR et GSR), GyTAR minimise : (i) le délai de bout en bout, (ii) le taux de pertes des paquets de données ainsi que (iii) la surcharge des messages de contrôles.

GyTAR pourrait également être utilisé dans d'autres types de réseaux en plus des réseaux VANETs. Un exemple de réseaux dans lequel GyTAR pourrait être utilisé est les DTNs (*Delay Tolerant Networks*). Nous pensons en effet qu'au vu des caractéristiques des DTNs, GyTAR pourrait y être appliqué moyennant quelques adaptations. Il serait donc intéressant d'étudier notre protocole de routage dans ce type de réseaux.

Après avoir répondu à la problématique de routage dans les réseaux véhiculaires, nous allons présenter dans le chapitre suivant notre approche de diffusion géo-localisée de données.

Chapitre 5

GVI : UN MECANISME D'EMULATION D'UNE INFRASTRUCTURE DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN

5.1 Introduction

Vu la nature des services et des applications de sécurité routière et de confort, les architectures de communication des réseaux de véhicules doivent intégrer des mécanismes de dissémination de données efficaces et adaptés. En effet, plusieurs applications au sein des VANETs motivent ce type de mécanisme, telles que la diffusion des messages concernant l'état du trafic, des accidents, des travaux, etc. Les exemples de services ne se limitent pas seulement aux applications de sécurité routière mais d'autres types d'applications peuvent en bénéficier comme par exemple la diffusion d'informations pratiques par des fournisseurs de services aux automobilistes (nombre de places libres dans un parking, diffusion d'annonces publicitaires locales dans un rayon de plusieurs centaines de mètres autour de l'annonceur, etc...).

La plupart de ces services reposent sur l'idée de maintenir un message au sein d'une zone géographique spécifiée. Par exemple, si on souhaite utiliser le mécanisme IFITS, proposé dans le chapitre 3, pour mettre en place un système de gestion de trafic ou de détection d'embouteillage, on aura besoin d'installer une infrastructure au niveau de chaque intersection, pour maintenir et diffuser périodiquement des données concernant l'état du trafic au niveau des voies de circulation voisines, ce qui nécessite un investissement lequel peut être coûteux.

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau mécanisme qui permet d'émuler le fonctionnement d'une infrastructure fixe destinée à diffuser localement des paquets de données de manière périodique. Le reste du chapitre est organisé comme suit : la section 2 présente la problématique traitée. Dans la section 3, nous montrons l'intérêt de disposer d'une infrastructure pour la dissémination d'information dans les réseaux de véhicules. La section 4 décrit le principe de fonctionnement du mécanisme proposé. Dans les sections 5 et 6, nous étudions les performances de notre approche analytiquement et par simulation. Dans la section 7, nous

discutons les diverses applications/services qui peuvent profiter de notre infrastructure virtuelle. La section 8 conclut ce chapitre.

5.2 Problématique posée

Les applications et les services qui requièrent des communications one-to-many sont nombreux. Ils reposent sur l'idée d'envoyer des messages à un groupe de véhicules localisés dans une zone géographique. Une solution possible serait d'installer une infrastructure au niveau de chaque zone géographique où on veut maintenir et diffuser périodiquement des données. Cependant, cette installation est fastidieuse et peut s'avérer coûteuse notamment lorsque l'étendue du réseau routier est vaste.

Autre aspect de la problématique concerne l'optimisation de la dissémination dans le cas où l'on désire offrir une solution purement ad hoc, basée sur les communications inter-véhicules. En effet, il est nécessaire de résoudre le problème de redondance afin de garantir une meilleure utilisation des ressources radio.

Le problème posé peut alors s'exprimer de la manière suivante : peut-on émuler le fonctionnement d'une infrastructure classique tout en évitant la surcharge de la bande passante du réseau véhiculaire ad hoc?

5.3 Dissémination et diffusion de données dans VANETs

5.3.1 La géo-diffusion

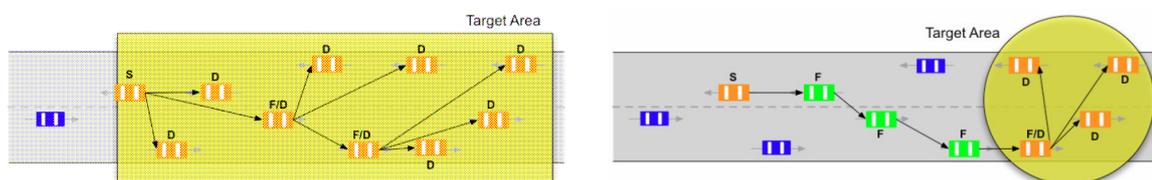
La dissémination d'information consiste à acheminer une information d'une source vers une ou plusieurs destinations, en assurant un délai d'acheminement réduit, une grande fiabilité et une meilleure utilisation des ressources.

L'inondation est le protocole le plus naïf pour la diffusion dans les réseaux ad hoc. Dans celui-ci, chaque nœud rediffuse systématiquement le paquet reçu une seule fois. Le problème est que cette rediffusion systématique cause inutilement une consommation excessive de bande passante vu que chaque nœud va recevoir plusieurs fois la même information via le canal sans fil. Ce problème est connu sous le nom de tempête de diffusion ou "*broadcast storm problem*" [83]. De plus, dans le cas de réseaux ad hoc denses tels que les réseaux de véhicules, le fait que chaque nœud rediffuse systématiquement génère un nombre important de collisions qui ne seront pas corrigés par la couche MAC (absence d'acquiescement lors de la diffusion). Ce qui réduit donc

l'efficacité et la fiabilité de la diffusion. Cette technique est donc non optimale du point de vue du réseau et non adaptée à la dissémination d'information dans les réseaux de véhicules.

La diffusion basée sur la localisation semble être la mieux adaptée aux VANETs pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ce type de diffusion permet d'optimiser la dissémination des données en sélectionnant seulement certains nœuds responsables de la rediffusion en fonction de leurs positions géographiques. De plus, la disponibilité de récepteurs GPS peu coûteux sur le marché permet de caractériser les destinations ciblées par l'opération de dissémination par la position et/ou la région géographique.

Désormais, on parle de géo-diffusion qui se base sur le même concept que le multicast. En effet, le multicast est utilisé par des applications qui souhaitent transmettre des informations vers plus d'une destination. Un nœud voulant recevoir les données, doit d'abord rejoindre un groupe multicast. Les messages envoyés sont alors reçus par tous les membres du groupe. La géo-diffusion quant à elle adopte le même principe de fonctionnement, à la différence qu'au lieu de rejoindre explicitement un groupe multicast, les nœuds sont implicitement membres du même groupe s'ils sont dans une certaine zone géographique. Le groupe devient dans ce cas groupe géocast. Dans ce type de protocoles, la terminologie suivante est utilisée : (i) Groupe géocast : les membres d'un groupe sont définis par leur localisation géographique, (ii) Zone géocast : l'espace géographique où l'ensemble des nœuds mobiles membres d'un groupe géocast sont localisés. Entrer dans la zone revient à rejoindre le groupe et vice versa, et (iii) Zone de relayage (forwarding zone) : la zone où les paquets de données sont relayés. Chaque groupe géocast dispose d'une zone de relayage, et seuls les nœuds se trouvant à l'intérieur peuvent relayer les paquets. Une zone géocast peut être incluse dans une zone de relayage (cf. figure 5.1 (a)) ou non (cf. figure 5.1 (b)).



(a) Géo-diffusion avec une zone de relayage incluse dans la zone cible.

(b) Géo-diffusion avec une zone de relayage distante de la zone cible.

Figure 5.1 : La géo-diffusion.

Dans ce qui suit, nous allons présenter brièvement quelques solutions de dissémination de données pour les réseaux de véhicules, que nous avons identifiées dans la littérature.

5.3.2 La dissémination dans les réseaux de véhicules : nécessité de l'infrastructure

Avant de présenter quelques solutions de dissémination de données dans les réseaux VANETs, nous allons décrire un mécanisme que l'on retrouve dans de nombreux protocoles de dissémination à savoir le DDT (*Distance Defer Transfer*) [84]. En effet, pour disséminer le plus rapidement possible, DDT propose de relayer l'information par les nœuds les plus éloignés, en supposant que les nœuds intermédiaires écoutent simplement le message. Pour élire le nœud le plus éloigné, les récepteurs calculent la distance de l'émetteur grâce à la position insérée dans le message. Un temps d'attente inversement proportionnel à cette distance est alors enclenché avant la réémission. Ainsi, le premier à réémettre sera le nœud le plus éloigné et les autres nœuds annuleront leur réémission à la réception du message rediffusé. La formule 5.1 montre le calcul effectué pour borner le délai d'attente.

$$WT(d) = -\frac{MaxWT}{Range} \cdot d^* + MaxWT; \quad (5.1)$$

$$d^* = \min(d, Range)$$

Ainsi, plusieurs protocoles de dissémination qui ont été proposés ces dernières années, utilisent ce mécanisme de délai inversement proportionnel à la distance pour essayer de propager le plus rapidement l'information :

- La solution proposée dans [85] permet la dissémination dans une zone locale autour de l'initiateur. Si le message atteint un certain seuil de 'nombre de sauts', alors le message n'est pas réémis. Une zone de pertinence est définie dans le message pour informer les conducteurs concernés. Pour augmenter la vitesse de propagation du message, l'auteur propose d'utiliser le mécanisme où le délai d'attente pour la réémission est inversement proportionnel à la distance de l'émetteur [84].

- Dans [86], l'auteur propose une solution basée sur les probabilités de diffusion pour résoudre le problème du "*broadcast storm*". Pour cela il utilise la table des voisins à 1 et 2 sauts ainsi que la densité des nœuds environnants. Il utilise aussi le mécanisme de délai inversement proportionnel à la distance.

- Le protocole ODAM (*Optimized Dissemination of Alarm Messages*) [87] propose l'émission périodique du message d'alerte par l'initiateur. La réémission du message est limitée à la zone de risque définie dans le message. De plus, il utilise aussi le mécanisme de délai en fonction de la distance [84] pour sélectionner certains nœuds qui vont réémettre le message.

Ces protocoles optimisent la dissémination d'information en sélectionnant seulement quelques nœuds pour la retransmission des messages. Ils tentent d'assurer à la fois un délai d'acheminement réduit et une meilleure utilisation des ressources. Cependant, ces mécanismes partent de l'hypothèse que le réseau est complètement connecté et ne prennent pas en considération la fragmentation du réseau en fonction des conditions spatio-temporelles. De plus, les résultats présentés dans [88] montrent que des problèmes tels que le partitionnement du réseau peuvent être fréquents. Ceci est particulièrement vrai lorsque le système IVC est peu répandu dans les véhicules. Par conséquent, d'autres solutions de dissémination proposées dans le cadre des réseaux de véhicules, résolvent ce problème en combinant une approche ad hoc de retransmission basée sur la localisation avec une diffusion locale utilisant une infrastructure :

- Le protocole STEID [89] (*Spatio-Temporal Information Dissemination*) propose de résoudre les besoins en termes de fiabilité spatiale et temporelle. Pour cela STEID s'exécute sur un réseau hybride de type 802.11 et de type cellulaire. L'idée générale de cette architecture est d'utiliser le réseau WiFi pour transférer l'ensemble des alertes au sein d'un groupe de véhicules connectés car le wifi est peu coûteux et il s'affranchit bien du facteur d'échelle. Le réseau cellulaire est quant à lui utilisé pour améliorer la fiabilité lorsque le réseau est partitionné en plusieurs morceaux.

- UMB (*Urban Multi-Hop Broadcast Protocol*) [90] est un autre protocole de dissémination adapté à un environnement urbain et qui utilise l'infrastructure. Il comprend deux phases : la première appelée diffusion directionnelle où la source sélectionne un nœud dans la direction de diffusion pour effectuer le relayage des données au niveau d'un tronçon de route, et la deuxième diffusion locale au niveau des intersections, pour disséminer les paquets dans toutes les directions. Ce protocole prévoit l'utilisation de répéteurs fixes placés au niveau de chaque intersection et destinés à transférer les paquets de données aux nœuds localisés au niveau d'une intersection. Un inconvénient de ce type d'approche est qu'elle nécessite l'installation de répéteurs fixes au niveau de chaque intersection. Cette installation est fastidieuse et peut s'avérer coûteuse notamment lorsque l'étendue du réseau routier couvert par le réseau ad hoc inter-véhiculaire est vaste.

Le mécanisme GVI (*Geo-localized Virtual Infrastructure*) que nous proposons permet d'émuler le fonctionnement d'une telle infrastructure. Son objectif est d'assurer la diffusion périodique des paquets de données au niveau des intersections. Il permet ainsi de répondre aux besoins des protocoles de dissémination existants et des services et applications ITS en termes d'infrastructures tout en évitant le cout d'installation et de maintenance de tels équipements (répéteurs).

5.4 Principe de fonctionnement de GVI

5.4.1 Hypothèses

Dans GVI, on suppose que chaque véhicule est équipé d'un module WiFi pour effectuer une diffusion locale et d'un appareil conventionnel de navigation assisté par satellite comprenant au moins :

- un récepteur, par exemple de type GPS ou Galileo, permettant d'obtenir à chaque instant ses propres coordonnées géographiques ; et
- une carte routière numérique représentative du réseau routier couplée au récepteur GPS pour visualiser la position instantanée du nœud mobile sur la carte routière.

5.4.2 Description détaillée du protocole

Le mécanisme GVI consiste à émuler une infrastructure diffusant des données de manière périodique de sorte que tous les véhicules qui circulent au niveau de la zone de diffusion reçoivent les paquets de données. Pour ce faire, GVI définit un algorithme d'élection d'un véhicule diffuseur. Cet algorithme est exécuté de façon périodique et comprend deux étapes : (i) une première étape de sélection des véhicules candidats, et (ii) une deuxième étape d'élection du véhicule diffuseur parmi la liste des véhicules candidats.

La question qui se pose est de savoir où positionner notre infrastructure virtuelle. Étant donné qu'on s'intéresse à un environnement urbain, il nous semble plus judicieux de choisir une intersection comme zone de geocast à l'intérieur de laquelle les données seront stationnaires. En effet, un environnement urbain est caractérisé par sa structure en routes croisées comme représenté sur la figure 5.2, avec des endroits d'arrêt aux feux tricolores et par conséquent, une grande densité de voitures au niveau des intersections.

de véhicule candidat à condition qu'il se dirige vers le point d'ancrage virtuel C_i et qu'il soit localisé dans une zone d'ancrage A_i incluse dans la cellule Z_i .

La figure 5.3 illustre de manière schématique, un exemple de scénario dans lequel un ensemble de véhicules candidats est sélectionné pour l'élection d'un véhicule diffuseur au niveau d'une intersection. Tel est le cas des véhicules référencés 2, 3, 5, 7 localisés dans la zone de notification A_i . Les véhicules référencés 1, 4, 6, 8 ne sont pas retenus en tant que véhicules candidats étant donné qu'ils s'éloignent du point d'ancrage virtuel C_i , bien qu'ils soient localisés dans la zone de notification A_i .

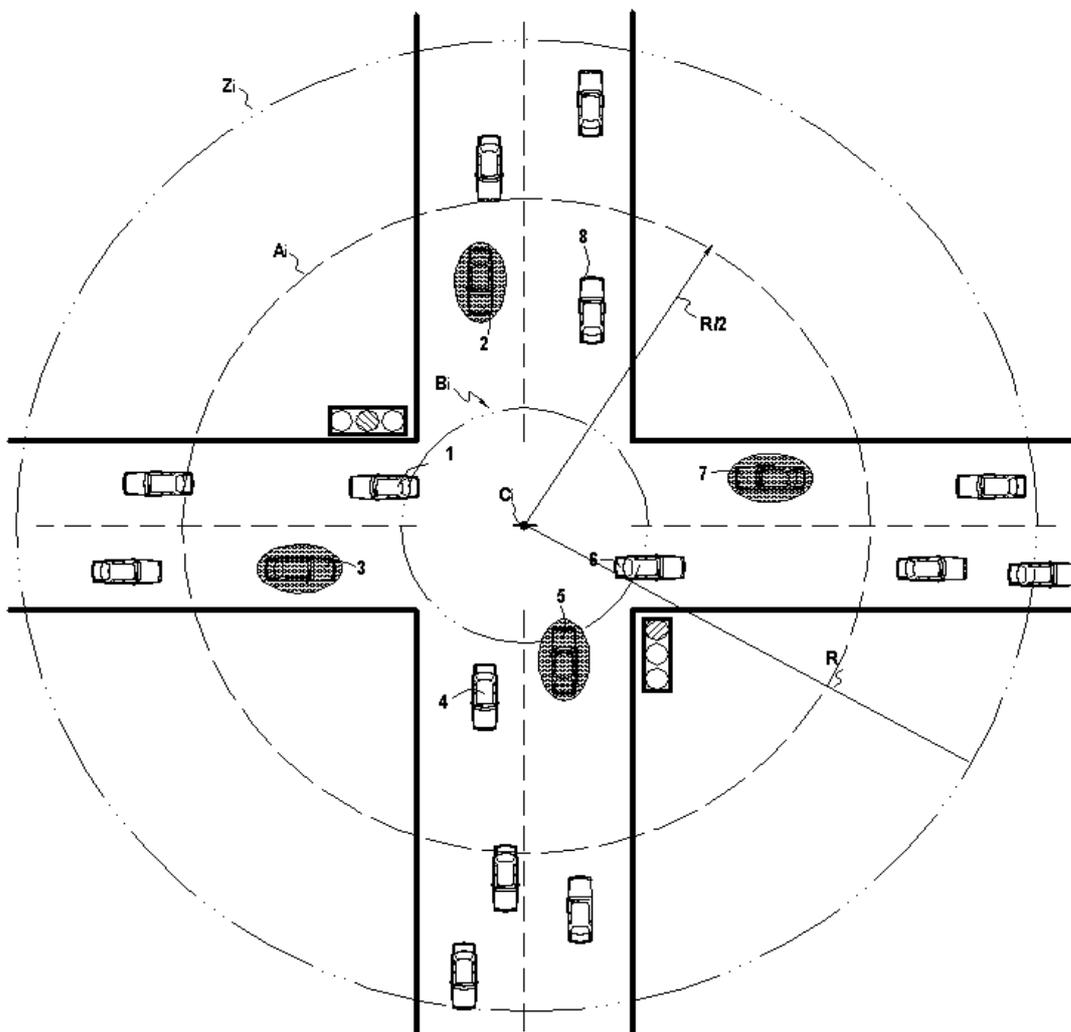


Figure 5.3 : Sélection des véhicules candidats dans GVI.

De manière avantageuse, chaque véhicule est apte à déterminer de manière autonome s'il est candidat à l'élection du véhicule diffuseur. Pour cela, il calcule la distance qui le sépare du point d'ancrage virtuel C_i et vérifie si elle est inférieure à $R/2$ (moitié de la portée de transmission d'un véhicule). Ainsi, la sélection des véhicules candidats s'effectue de manière totalement distribuée au niveau de chaque véhicule, sans la nécessité d'un échange d'informations avec une infrastructure centralisée.

5.4.2.2 Deuxième étape : élection du véhicule diffuseur

Parmi les véhicules candidats sélectionnés lors de l'étape précédente, un seul véhicule sera élu comme véhicule diffuseur. Il s'agit du véhicule qui a la durée de parcours estimée pour atteindre la zone de diffusion B_i la plus proche de la période de diffusion souhaitée T . Ainsi, il y a la garantie que lorsque le véhicule élu diffuse le paquet, celui-ci se trouve à proximité du centre de la zone de geocast.

Lors de cette étape d'élection, chaque véhicule candidat effectue un ensemble de sous-étapes illustrées dans l'organigramme de la figure 5.4. En effet, chaque véhicule candidat doit calculer un temps d'attente WT à l'issue duquel il diffuse un message de notification M informant les autres véhicules candidats qu'il est élu véhicule diffuseur. Le véhicule qui sera élu est le premier véhicule qui envoie ce message informatif puisque les autres véhicules candidats, déjà notifiés, doivent arrêter leur compteur et s'abstenir. Il s'agit bien évidemment du véhicule qui calcule le temps d'attente WT le plus court. Et pour calculer ce temps d'attente, un véhicule candidat commence par calculer un poids P en fonction de Δt (la durée de parcours nécessaire pour atteindre la zone de diffusion B_i).

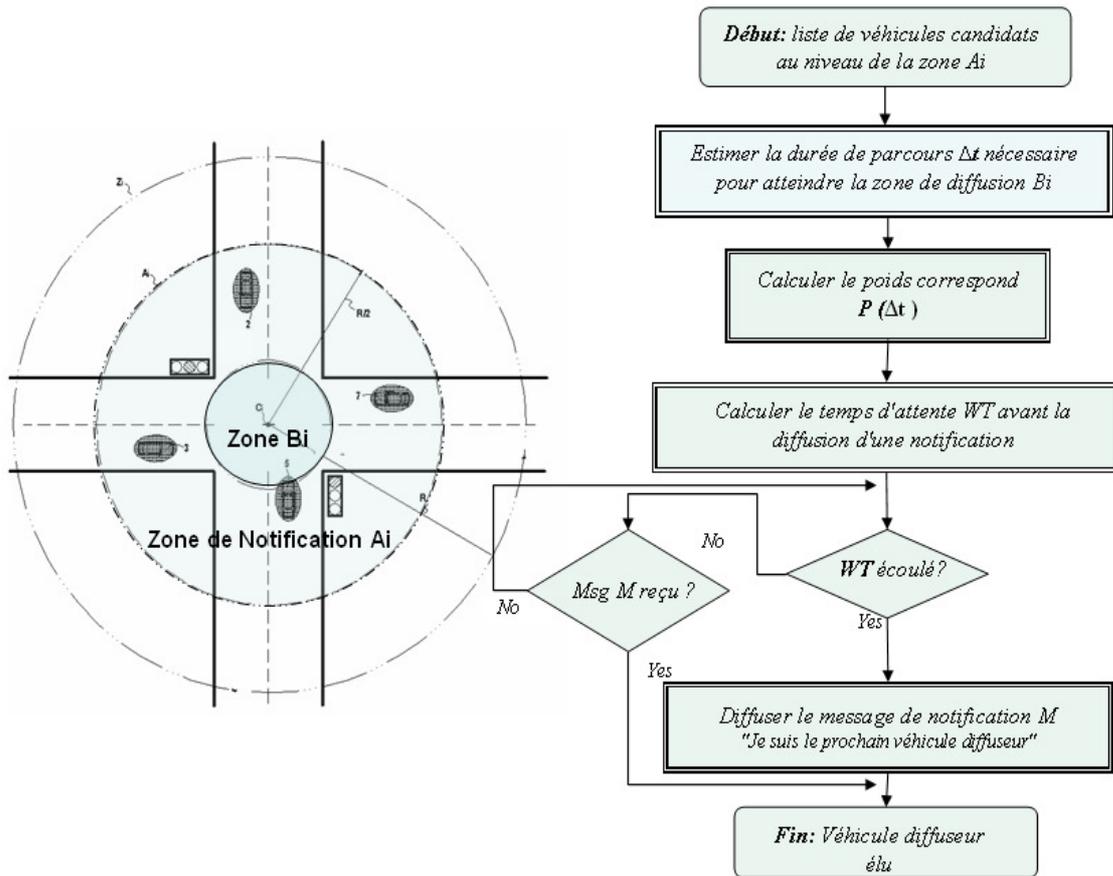


Figure 5.4 : Sous-étapes d'élection d'un véhicule diffuseur.

Dans ce qui suit, nous allons décrire ces différentes sous-étapes pour l'élection d'un véhicule diffuseur parmi les véhicules candidats sélectionnés :

- Estimation de la durée de parcours Δt nécessaire pour atteindre la zone de diffusion B_i

Chaque véhicule candidat estime une durée de parcours nécessaire pour atteindre la zone de diffusion B_i où le véhicule élu pourrait effectuer une diffusion locale, avec : $\Delta t = \Delta t_w + \Delta t_m$, où :

- Δt_w (ou D) désigne le délai engendré par le feu ; et

- Δt_m désigne le temps nécessaire pour atteindre la zone de diffusion B_i . Ce temps étant calculé en fonction de la vitesse du véhicule et de la distance à parcourir pour atteindre le centre de l'intersection.

➤ Calcul d'un poids P correspondant à la durée du parcours Δt

Le calcul du poids étant adapté pour que sa valeur soit d'autant plus élevée que la durée de parcours estimée pour atteindre la zone de diffusion B_i est proche de la période de diffusion T . Ainsi, le véhicule dont la durée de parcours estimée est la plus proche de T aura le plus grand poids et sera donc élu comme véhicule diffuseur.

Ce poids pourrait être calculé en appliquant par exemple une fonction de Gauss classique représentée graphiquement par la figure 5.5 et définie par l'expression suivante :

$$P(\Delta t_i) \equiv P_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta t_i - T}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5.2)$$

où :

- Δt_i est le temps de parcours estimé du $i^{\text{ème}}$ véhicule candidat pour qu'il atteigne la zone de diffusion B_i ;
- σ est une constante temporelle correspondant à la largeur temporelle à mi-hauteur de la gaussienne représentative de la fonction $P(\Delta t)$;
- et T correspond à la valeur moyenne de la fonction $P(\Delta t_i)$ et désigne l'intervalle de temps de référence entre deux instants de diffusion successifs au niveau de la zone B_i .

Cette fonction permet d'obtenir un poids maximal pour un véhicule candidat dont la durée de parcours estimée pour atteindre la zone de diffusion B_i correspond à la période de diffusion souhaitée T et un poids d'autant plus faible que la valeur absolue de la différence entre la durée de parcours estimée et la période T est élevée.

Notons que la valeur de la constante temporelle σ est définie en fonction de la tolérance désirée autour de l'intervalle de temps de référence T lors de l'élection du nœud diffuseur. Ce processus sera d'autant plus sélectif que la valeur de la constante temporelle est faible. Dans le cas extrême où $\sigma=0$, la gaussienne devient une impulsion de Dirac δ_T telle que $\delta_T(T)=1$ et $\delta_T(\Delta t)=0$ pour tout $\Delta t \neq T$. Dans ce cas, chaque véhicule diffuseur est un véhicule candidat pour lequel la valeur du temps de parcours estimé pour atteindre le centre de la cellule correspond précisément à celle de l'intervalle de temps de référence T . En pratique, il est peu probable de trouver pendant

chaque cycle de diffusion, un véhicule candidat tel que son temps de parcours estimé soit exactement égal à T . Par conséquent, la valeur de σ sera choisie non nulle et ajustée, pour permettre à un nœud candidat dont le temps de parcours estimé est suffisamment proche de T d'être élu à chaque cycle de diffusion.

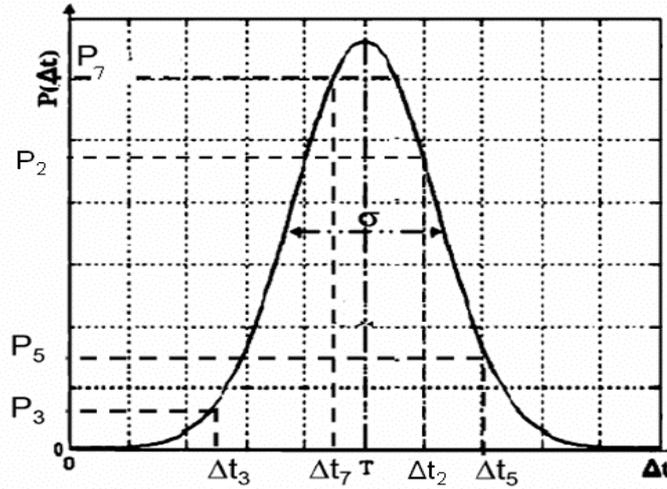


Figure 5.5 : Fonction de Gauss pour le calcul du poids.

Dans cet exemple, le poids $P(\Delta t)$ qui correspond à une durée de parcours Δt est calculé selon une fonction de Gauss. Bien évidemment, on pourra utiliser toute autre fonction dont la valeur maximale est atteinte pour $\Delta t = T$ et permettant d'obtenir un poids d'autant plus faible que la différence $|T - \Delta t|$ est élevée. Ainsi, le poids P_i pourrait être déterminé par exemple selon une fonction « triangle » représentée graphiquement sur la figure 5.6 et définie par l'expression suivante :

$$P_i \equiv P(\Delta t_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } \Delta t \geq T + \tau \text{ ou } 0 \leq \Delta t \leq T - \tau \\ \frac{P_{Max}}{\tau} \Delta t + P_{Max} \left(1 - \frac{T}{\tau}\right) & \text{si } T - \tau < \Delta t \leq T \\ -\frac{P_{Max}}{\tau} \Delta t + P_{Max} \left(1 + \frac{T}{\tau}\right) & \text{si } T \leq \Delta t < T + \tau \end{cases} \quad (5.3)$$

où :

- τ est une constante réelle positive permettant de définir la largeur de la fonction triangle comme représenté sur la figure 5.6 ;
- P_{Max} correspond à la valeur du poids maximal telle que $P_{Max} = P(T)$;
- et T désigne l'intervalle de temps de référence.

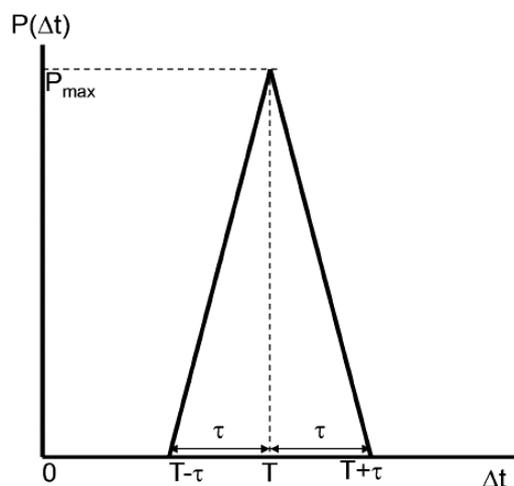


Figure 5.6 : Autre fonction possible pour le calcul du poids : la fonction triangle.

➤ Calcul du temps d'attente WT en fonction du poids P

Le calcul du temps d'attente étant adapté pour que sa valeur soit d'autant plus faible que le poids P est élevé. Ainsi chaque véhicule candidat calcule son temps d'attente WT_i en fonction du poids $P_i \equiv P(\Delta t_i)$ obtenu à l'issue de la sous-étape précédente. Le temps d'attente WT_i est déterminé en utilisant l'expression suivante :

$$WT_i(P_i) = WT_{Max} \left(1 - \frac{P_i}{P_{max}} \right) \quad (5.4)$$

où :

- WT_{Max} est une constante réelle désignant le temps d'attente maximum allouable à un véhicule candidat $WT_{Max} = WT_i(P_i=0)$,
- P_{Max} correspond à la valeur du poids maximal telle que $P_{Max} = P(T)$;
- P_i/P_{max} désigne le poids normalisé du $i^{\text{ème}}$ véhicule candidat,

Ainsi, le temps d'attente WT_i déterminé selon l'expression 5.4 est d'autant plus court que le poids normalisé est proche de 1.

➤ Envoi d'un message informatif

A l'issue du temps d'attente, le véhicule candidat diffuse un message de notification M informant qu'il est élu véhicule diffuseur. Il n'envoie ce message que s'il n'a pas reçu un tel message de notification d'un autre véhicule candidat. Ainsi, un véhicule se trouvant en périphérie de la zone

de notification A_i , doit pouvoir communiquer avec tous les véhicules localisés dans cette zone, et en particulier avec ceux situés en périphérie de la zone A_i et diamétralement opposés. C'est la raison pour laquelle on a choisi une zone de notification de rayon égale à la moitié de la portée de transmission d'un véhicule, de sorte que son diamètre soit égal à cette portée de transmission.

Notons que le véhicule candidat qui a le temps d'attente le plus court sera le premier à envoyer ce message de notification M aux autres véhicules candidats leur indiquant qu'il a acquis le statut de véhicule diffuseur. Il diffusera le paquet de donnée D lorsque celui-ci se trouve à proximité du centre de la zone geocast (au niveau de la zone de diffusion B_i).

Il faut aussi noter que la probabilité d'avoir une collision entre deux de ces messages de notification est assez faible. Ceci est dû au fait qu'il y a une faible chance que deux véhicules calculent le même temps d'attente. En effet, la probabilité de calculer un temps de parcours semblable et par conséquent avoir un même poids est assez faible. Dans le cas peu probable que ce cas de figure se produit, le GVI aurait plus qu'un véhicule diffuseur élu pour le cycle correspondant au lieu d'un. Tous ces véhicules élus exécuteront une diffusion locale en parvenant au centre d'intersection. Ainsi, de telles collisions ne mettront pas en échec l'algorithme d'élection du véhicule diffuseur.

La figure 5.7 montre un exemple d'élection d'un véhicule diffuseur à partir de la liste de véhicules candidats $\{ 2, 3, 5, 7 \}$ préalablement sélectionnés.

Ainsi les véhicules candidats référencés 2, 3, 5, et 7 commencent par déterminer de manière autonome leur temps de parcours respectif noté Δt_2 , Δt_3 , Δt_5 , et Δt_7 . On suppose que $\Delta t_3 < \Delta t_7 < \Delta t_2 < \Delta t_5$.

Lors d'une deuxième sous-étape, chaque véhicule candidat 2, 3, 5, 7 calcule un poids P (noté respectivement P_2 , P_3 , P_5 , P_7) en fonction de sa durée de parcours estimée Δt_i (notée respectivement Δt_2 , Δt_3 , Δt_5 , Δt_7) en utilisant l'expression 5.2. Ainsi, les poids calculés des véhicules candidats 2, 3, 5, 7 sont telles que $P_3 \equiv P(\Delta t_3) < P(\Delta t_7) < P_2(\Delta t_2) < P_7(\Delta t_7)$ comme illustré sur la figure 5.7.

Ensuite, chaque véhicule candidat calcule un temps d'attente WT_i en fonction du poids $P_i \equiv P(\Delta t_i)$. Le véhicule candidat 3 dont le poids $P(\Delta t_3)$ est le plus faible ($P(\Delta t_3) < P(\Delta t_7) < P(\Delta t_2) <$

$P(\Delta t_7)$ calcule, d'après l'expression 5.4, un temps d'attente WT_3 élevé, tel que $WT_3 > WT_5 > WT_2 > WT_7$.

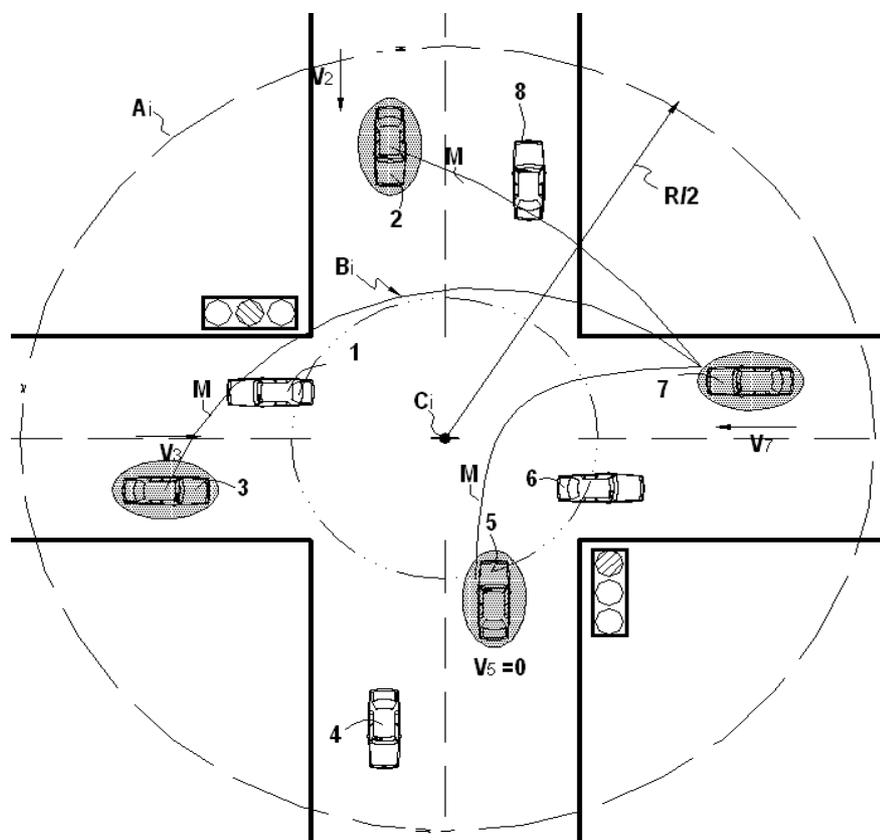


Figure 5.7 : Election d'un véhicule diffuseur dans GVI.

Dès lors que le temps d'attente WT_i est déterminé, chaque véhicule candidat 2, 3, 5, 7 active un compteur initialisé avec sa valeur WT_i et décompte le temps à partir de cette valeur, tant que le véhicule n'est pas notifié de l'élection d'un véhicule diffuseur. Dans notre scénario, le véhicule candidat 7 ayant calculé le temps d'attente le plus faible ($WT_7 < WT_2 < WT_5 < WT_3$) est le premier véhicule candidat à diffuser le message de notification M. De ce fait, il est élu véhicule diffuseur. Sur réception du message de notification, les véhicules candidats restants 2, 3, 5 sont informés que le nœud 7 vient d'être élu véhicule diffuseur.

Etant donné que le véhicule candidat 7 venant d'être élu est éloigné du centre de la zone geocast Z_i d'une distance égale au plus à la moitié du rayon de transmission d'un véhicule, on notera que celui-ci peut transmettre le message de notification M à tous les nœuds situés dans la zone de notification A_i . En particulier, si le véhicule 7 s'était trouvé en périphérie de la zone A_i au

moment de l'élection, c'est-à-dire à une distance égale à la moitié de la portée de transmission ($R/2$) du centre C_i , celui-ci aurait été apte à informer des véhicules candidats localisés en périphérie de la zone de notification A_i et diamétralement opposés par rapport à ce véhicule. Dans ce cas limite, la distance séparant le véhicule diffuseur élu (véhicule 7) et les véhicules candidats restants aurait été égale au rayon de transmission d'un nœud.

Lorsque le véhicule diffuseur élu (véhicule 7) arrive à la zone de diffusion B_i (à proximité du centre C_i de la cellule Z_i), il diffuse le paquet de données D à tous les véhicules voisins localisés dans cette cellule.

5.4.2.3 Synthèse

Les deux étapes décrites ci-dessus sont réitérées de sorte que les véhicules diffuseurs élus diffusent le paquet de données D à intervalles de temps réguliers. Chaque itération définit un cycle lors duquel le paquet de données est diffusé par un véhicule diffuseur. En élisant à chaque cycle un véhicule diffuseur dont le temps estimé pour atteindre le centre d'une intersection est le plus proche possible de l'intervalle de temps de référence T , on émule une infrastructure diffusant les données de manière périodique. Ainsi, l'intersection peut être considérée comme une zone de geocast à l'intérieur de laquelle les données sont stationnaires.

De manière avantageuse, les deux étapes du mécanisme GVI assurent l'élection d'un seul véhicule diffuseur par cycle, parmi tous les véhicules présents dans la zone de geocast. Ceci permet de gagner en termes de surcharge du réseau et d'éviter des éventuelles collisions entre plusieurs diffuseurs au même temps.

5.5 Evaluation des performances de GVI

Dans cette section, nous allons montrer l'intérêt de l'utilisation de notre approche en utilisant des simulations. Pour ce faire, nous avons utilisé QNAP (*Queuing Network Analysis Package*) [91], un ensemble d'outils intégrés pour l'analyse des réseaux de files d'attente, pour implémenter la solution et étudier ses performances. En effet, vu le choix de positionner notre infrastructure virtuelle au niveau d'un carrefour à feux, il nous semble plus judicieux de modéliser un tel scénario de trafic routier en quatre files d'attente avec serveurs, chacune représentant un tronçon de route avec le feu correspondant comme le montre la figure 5.8.

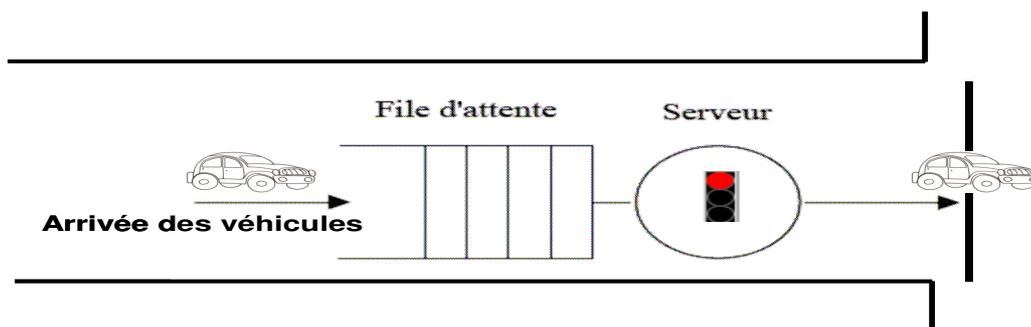


Figure 5.8 : Simulation en file d'attente.

5.5.1 Paramètres de simulations

Comme mentionné ci-dessus, l'environnement simulé est une intersection à feux de signalisation où se croisent deux voies de circulation perpendiculaires (voir figure 5.9). Chaque voie possède sa file de voitures en attente du feu vert.

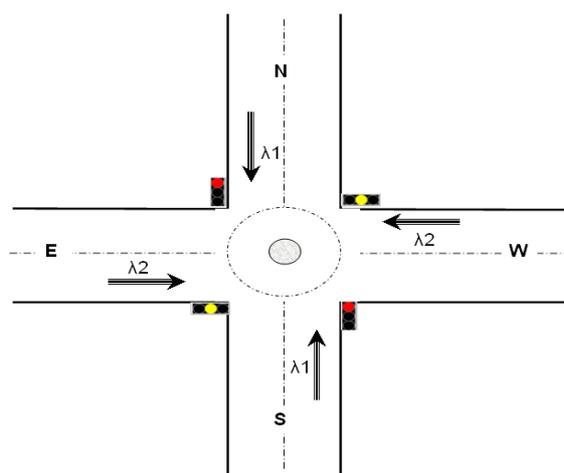


Figure 5.9 : Scénario de simulation.

On suppose que le courant d'arrivée vers le carrefour suit une loi de Poisson de paramètre λ . Le cycle de chaque feu de signalisation dure C secondes et comporte deux phases (feu rouge et feu vert) de durée T_r et T_g respectivement. Le temps de service a une durée constante s . Il correspond au temps nécessaire à une voiture pour traverser le feu et atteindre le centre de l'intersection. Ainsi, le débit de départ v au niveau du feu peut être calculé comme suit :

$$v_i = \frac{1}{s} \cdot \frac{T_g}{T_g + T_r} \quad (5.5)$$

Ainsi, les paramètres (λ_1, ν_1) et (λ_2, ν_2) sont les deux quantités qui caractérisent le trafic sur la voie Est-Ouest et Nord-Sud respectivement. Notons enfin qu'on peut aussi caractériser le trafic routier sur une voie par la charge ρ_i définie comme le débit d'arrivée sur le débit de départ :

$$\rho_i = \lambda_i \cdot s \cdot \frac{T_g + T_r}{T_g} \quad (5.6)$$

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des paramètres de simulation utilisés.

Tableau 5-1 : Paramètres de simulation.

SIMULATION / SCENARIO	
Temps de simulation	1.000.000s
Durée du cycle (C=T _g +T _r)	80s
Durée du feu vert et rouge (T _g , T _r)	(40s,40s)
Temps de service S	2 s
Portée radio (TR)	200m
Zone B _i	340 m ²
Zone A _i : ($\pi \cdot (TR/2)^2$)	31400 m ²
Zone de geocast : ($\pi \cdot TR^2$)	125600 m ²
Période de diffusion	5 – 40 s
Vitesse des véhicules (ville)	20-50±5 Km/h

Nous présentons dans ce qui suit, les résultats de simulations ainsi que leurs interprétations.

5.5.2 Résultats des simulations et analyse des performances

Les performances de notre approche sont évaluées selon les deux métriques suivantes :

- Le pourcentage des véhicules non informés ;
- Le nombre moyen de copies d'un message reçu par véhicule.

Nous notons que les résultats des simulations correspondent à deux scénarios : un premier scénario "intersection symétrique avec des débits d'arrivée égaux" pour lequel le trafic sur la voie Est-Ouest et la voie Nord-Sud est le même, et un deuxième scénario "intersection symétrique avec des débits d'arrivée différents".

Pour chacun de ces scénarios, on a fait varier la charge ρ afin d'avoir un trafic routier au niveau de l'intersection qui correspond aux trois cas de figures suivants (Trafic faible, moyen et dense). Les résultats de nos simulations sont présentés dans les figures 5.10, 5.11, 5.12 et 5.13.

Scénario1 : intersection symétrique avec des débits d'arrivée égaux

Dans ce scénario, les débits de départ des deux directions (v_1 et v_2) sont égaux à 0.25 veh/s, les débits d'arrivée des deux directions (λ_1 et λ_2) sont égaux aussi et varient de 0.1 veh/sec à 0.2 veh/s.

La figure 5.10 montre la relation entre la période de diffusion T et le pourcentage de véhicules qui reçoivent pas le paquet diffusé, et ceci pour différentes charges de trafic routier (Trafic faible, moyen et dense). On peut facilement constater que sous la même charge de trafic de véhicule ρ , l'augmentation du temps de référence T mène à une augmentation du taux de perte des paquets. En effet, pour des périodes de diffusion petites ($T < 20s$), tous les véhicules réussissent à recevoir le paquet diffusé puisque leur temps de séjour au niveau de la zone de geocast est largement supérieur à 20s. En d'autres termes, vu que le temps minimal mis par un véhicule pour traverser la zone de geocast est de l'ordre de 40s, tous les véhicules recevront au moins une fois le message broadcasté quand la période de diffusion T est inférieure à 20s. En revanche, quand le temps de référence devient assez grand ($T = 40s$) et dépasse ainsi le temps de séjour de certains véhicules, ces derniers traversent l'intersection avant la fin d'une diffusion et par conséquent, échouent à recevoir le paquet diffusé.

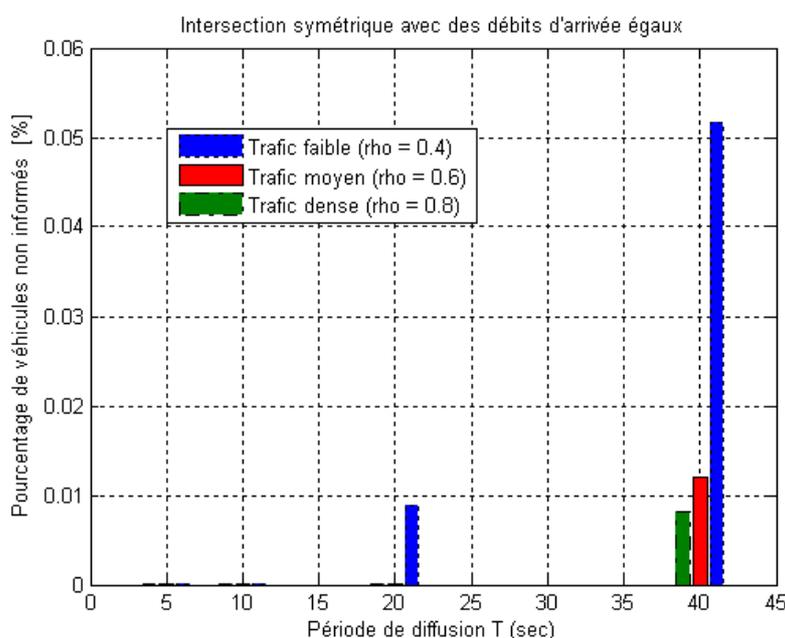


Figure 5.10 : Pourcentage des véhicules non informés vs Période de diffusion T (scénario 1).

En outre, la figure 5.10 montre que sous le même temps de référence T , plus de véhicules échouent à recevoir le paquet diffusé quand la densité de trafic est faible. Par exemple, pour une période de diffusion $T = 40s$, 5% de véhicules échouent à recevoir le paquet de données pour une charge de trafic $\rho = 0.4$, tandis que seulement 1% des véhicules sont non-informés quand la densité de trafic augmente ($\rho = 0.6$). Nous expliquons ceci aussi par le temps de séjour des véhicules au niveau de la zone de geocast. En effet, quand la densité des véhicules diminue, la vitesse des véhicules augmente [92], ce qui diminue à son tour le temps de séjour des véhicules au niveau de la zone de geocast. Ainsi, sous une charge de trafic de véhicule faible, les véhicules se déplacent plus rapidement et peuvent ensuite traverser l'intersection sans recevoir les données diffusées.

La figure 5.11 représente le nombre moyen de copies du même message reçu par un véhicule en fonction de la période de diffusion T , et ceci pour les différentes charges de trafic considérées. Les courbes obtenues montrent qu'au fur et à mesure que le temps de référence T diminue, le nombre de copies augmente. Nous expliquons ceci par le temps de séjour d'un véhicule au niveau de la zone de geocast. En effet, quand T est petit par rapport au temps mis par un véhicule pour traverser la zone de geocast, il n'est pas surprenant que le message soit reçu plus qu'une fois. Par exemple, pour $T = 10s$, chaque véhicule informé reçoit en moyenne 3 copies du message vu qu'il met au moins 40s pour traverser la zone de diffusion. En revanche, lorsque la période T est proche du temps minimal nécessaire pour traverser l'intersection ($T=40s$), les véhicules reçoivent en moyenne une seule copie du message diffusé.

Par ailleurs, vu que le temps de séjour varie avec la densité du trafic routier, le nombre moyen de copies varie aussi avec l'état du trafic. Ainsi, quand le trafic est fluide (charge ρ faible), les véhicules roulent plus vite et mettent moins de temps pour traverser la zone de geocast et par conséquent, ils recevront moins de copies du même message. A titre d'exemple, pour $T = 5s$, le nombre moyen de copies est égal à 6 quand la densité du trafic est faible et 10 quand le trafic routier est dense.

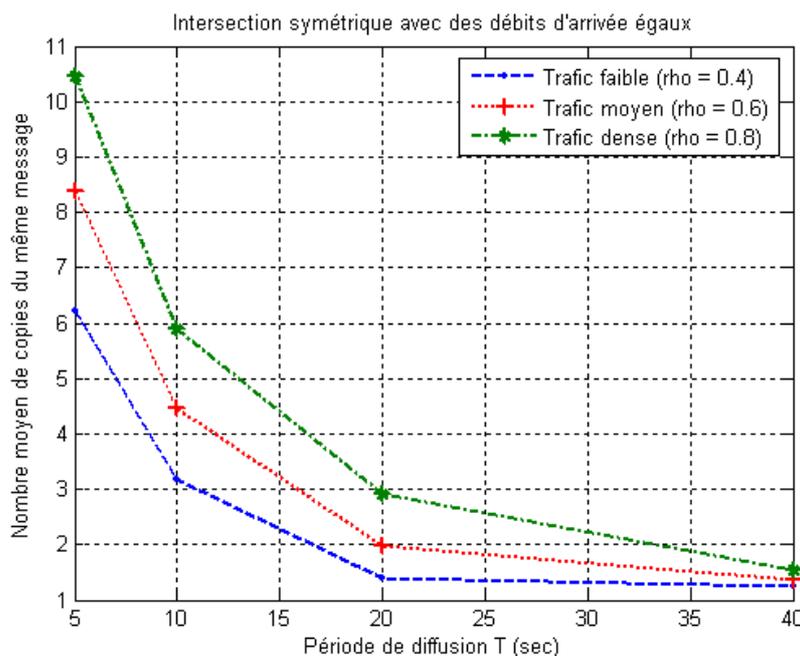


Figure 5.11 : Nombre moyen de copies du même message vs Période de diffusion T (scénario 1).

Scénario2 : intersection symétrique avec des débits d'arrivée différents

Nous considérons maintenant le cas d'un croisement entre une voie principale et une voie secondaire. Les débits de départ des deux directions (v_1 et v_2) sont égaux à 0.25 veh/s vu que les caractéristiques du feu de signalisation restent les mêmes. Par contre, leurs débits d'arrivée (λ_1 et λ_2) sont différents ($\lambda_1 > \lambda_2$). Par conséquent, la charge ρ_1 de la voie Nord-Sud varie de 0.9 veh/sec à 0.6 veh/sec alors que la charge ρ_2 de la voie Ouest-Est varie de 0.3veh/sec à 0.6 veh/sec.

Les résultats de nos simulations relatifs à ce scénario sont présentés dans les figures 5.12 et 5.13.. Celles-ci présentent respectivement le pourcentage de véhicules non informés et le nombre de copies du même message en fonction de la période de diffusion T.

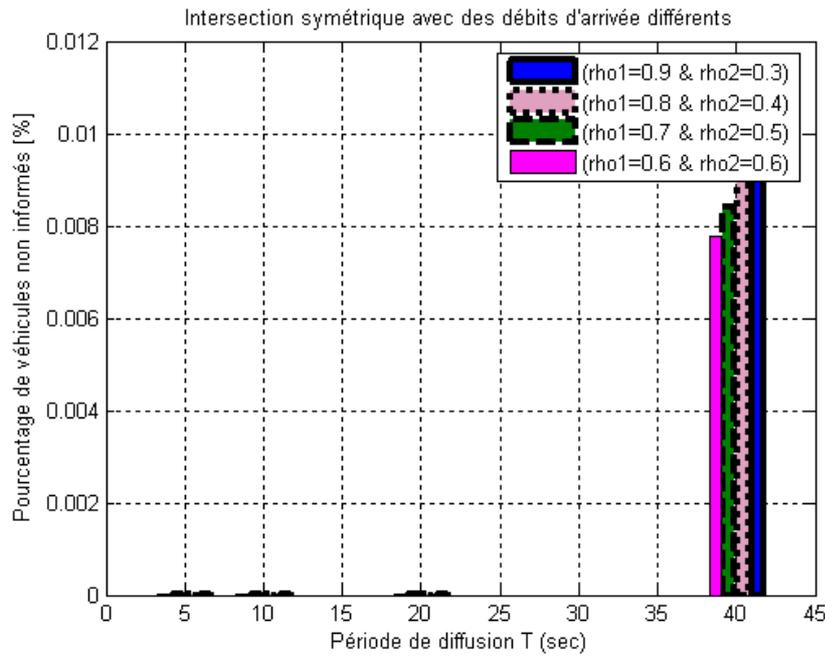


Figure 5.12 : Pourcentage des véhicules non informés vs Période de diffusion T (scenario 2).

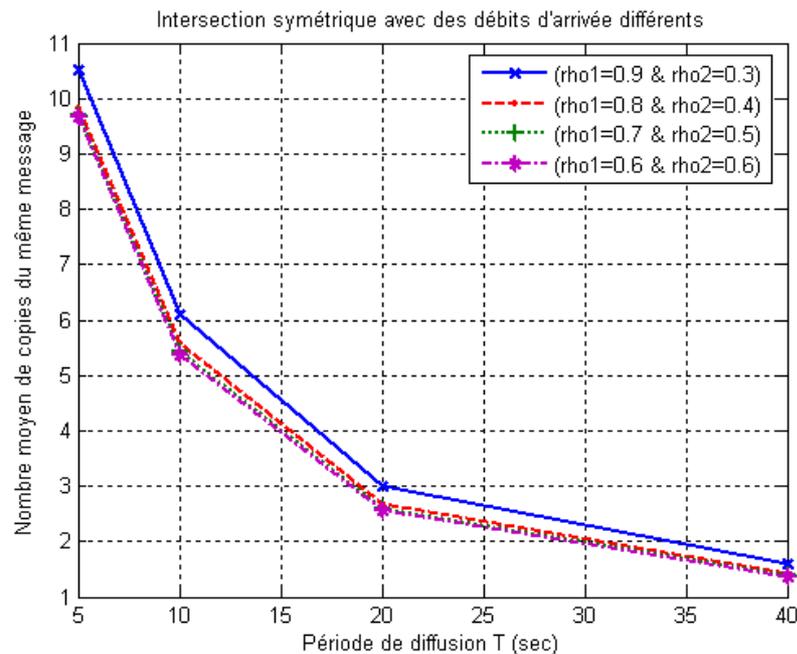


Figure 5.13 : Nombre moyen de copies du même message vs Période de diffusion T (scénario 2).

Nous constatons que l'allure des courbes des deux figures est semblable à celles obtenues dans le premier scénario. En effet, on voit bien que le pourcentage des véhicules qui échouent à recevoir le message augmente lorsque la valeur du temps de référence T augmente. Tandis que le nombre de copies du même message reçu diminue pour des valeurs élevées de T, et ceci pour les différentes charges de trafic considérées. De ce fait, nous pouvons conclure que la dissymétrie des deux voies n'influe pas beaucoup sur les performances de notre mécanisme.

Synthèse

Nous avons montré via les simulations qu'en changeant la valeur du temps de référence T , on peut avoir une sorte de compromis entre les deux métriques étudiées, à savoir le nombre de copies du même message (qui est une mesure de coût pour fournir le service) et la probabilité d'informer un véhicule (qui est une mesure de qualité de service). En effet, pour que le message soit reçu par tous les véhicules, il faut diminuer la valeur du temps de référence au détriment du surcout de communication généré. En revanche, on peut minimiser le nombre de copies du même message à condition qu'on tolère le fait que certains véhicules échouent à recevoir le message.

Nous avons également montré que la dissymétrie du trafic routier des deux voies n'a pas d'impact sur les performances et que les variations dans les résultats obtenus sont dues principalement à la variation du temps de séjour des véhicules au niveau de la zone de geocast.

5.6 Analyse du mécanisme GVI

Cette section couvre l'étude des performances du mécanisme GVI par une approche analytique. La première partie concerne l'étude de l'impact du temps de séjour moyen sur les performances de notre approche. Elle est suivie par une étude de la probabilité d'échec de notre algorithme d'élection.

5.6.1 Estimation du temps de séjour moyen par une approche analytique

Comme mentionné ci-dessus, l'objectif de cette première étude analytique est d'estimer le temps de séjour moyen d'un véhicule au niveau de la zone de geocast et son impact sur les performances de notre approche, et en particulier, sur le nombre moyen de copies du même message reçu.

Le temps de séjour S d'un véhicule est défini comme le temps mis par un le véhicule pour traverser toute la zone de geocast, tel que $S = D + M$ où :

- D désigne le temps d'attente ou le retard dû à la présence du feu de signalisation ;
- M désigne le temps nécessaire pour traverser toute la zone de geocast. Ce temps étant calculé en fonction de la vitesse du véhicule V et de la distance à parcourir ($L=2*R$, où R désigne le rayon de la zone de geocast).

Du fait de la difficulté de déterminer la distribution de ce temps de séjour et pour ne prendre le problème que dans sa forme la plus simple, nous allons se contenter de l'estimation du temps de séjour moyen $E[S]$:

$$E[S] = E[D] + E[M] \quad (5.7)$$

Bien évidemment, en absence d'un feu de signalisation, un véhicule se déplaçant avec une vitesse V met en moyenne $E[M] = E[L/V] = L E[1/V]$ pour traverser la zone de geocast. D'après [92], la distribution des vitesses des véhicules suit une loi de Gauss de moyenne μ et d'écart type σ

$$\text{où : } \mu = \frac{V^{\max} + V^{\min}}{2} \text{ et } \sigma = \frac{V^{\max} - V^{\min}}{2} .$$

Par conséquent,

$$E[M] = Lx E\left[\frac{1}{V}\right] = Lx \int_{v^{\min.}}^{v^{\max}} \frac{1}{v} \frac{1}{\sqrt{2\Pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dv \quad (5.8)$$

Nous allons évaluer dans ce qui suit le retard moyen $E[D]$ aux carrefours à feux :

- L'estimation du retard moyen $E[D]$ aux carrefours à feux par une approche analytique

Le retard moyen désigne la différence entre le temps moyen mis par un véhicule pour traverser le carrefour et le temps mis par un véhicule non gêné, c'est-à-dire sans arrêt ni ralentissement. Diverses méthodes peuvent être utilisées pour estimer ce temps d'attente à la traversée des carrefours signalisés. Citons notamment celle de Webster [93], la méthode HCM (*Highway Capacity Manual*) [94] ou encore celle présentée dans [95].

La méthode retenue ici pour le calcul du retard moyen est préconisée dans le manuel américain des capacités [94]. Cette approche présente l'avantage d'être généralement valide jusqu'à un ratio ρ proche de 1.2 environ.

Le retard, noté d , se décompose classiquement en deux termes $d1$ et $d2$ où :

- $d1$ correspond au retard uniforme. Il suppose des arrivées régulières de véhicules ;
- $d2$, lui, correspond au retard imputable au caractère aléatoire de ces arrivées.

Le retard à la traversée d'un carrefour à feux fixes est donné par l'expression suivante :

$$d = d1 + d2 \quad (5.9)$$

Si l'on tient compte de la coordination entre plusieurs carrefours successifs d'un itinéraire, la formulation s'écrit :

$$d = (DF) d1 + d2 \quad (5.10)$$

Dans la formule (5.10), DF est un coefficient quantifiant arbitrairement la qualité de la coordination. Ainsi, en l'absence de coordination, on adopte naturellement DF = 1. Dans les formulations précédentes, on a :

$$d_1 = 0.38C \frac{(1 - \frac{Tg}{C})^2}{(1 - \frac{Tg}{C} [\min(\rho, 1)])} \quad (5.11)$$

$$d_2 = 173 \cdot \rho^2 \cdot \left[(\rho - 1) + \sqrt{(\rho - 1)^2 + \frac{m \cdot \rho}{\nu}} \right] \quad (5.12)$$

avec les notations usuelles :

- $d1$, retard uniforme (en s/véh)
- $d2$, retard incrémental (en s/véh)
- ν = capacité ou débit de départ (en véh/s)
- $\rho = \lambda / \nu$, ratio débit d'arrivée/capacité avec $\rho \leq 1.0$
- Tg : durée du feu vert effective (en s)
- C , durée du cycle (en s)
- m , coefficient traduisant le degré de circulation en peloton. Dans le cas d'une coordination de qualité médiocre, on adopte la valeur $m = 8$.

Le retard total, noté $E[D]$, prend en compte les temps d'attente précédents et les retards imputables aux phénomènes de décélération et d'accélération. Une formulation approchée, calibrée à partir d'observations empiriques est proposée dans HCM. Elle correspond à :

$$E[D] = 1.3 d \quad (5.13)$$

La figure 5.14 représente le retard moyen, le temps de parcours moyen et le temps de séjour moyen en fonction de la charge ρ , et ceci en prenant en compte les paramètres du feu de signalisation considéré dans notre scénario de simulation ($C = 80s$, $T_r = T_g = 40s$, $v = 0.25veh/s$). La courbe de $E[M]$ montre que lorsque la vitesse des véhicules varie entre $V_{min} = 20 km/h$ et $V_{max} = 50 km/h$, un véhicule non gêné par un feu de signalisation met en moyenne 42.5 secondes pour traverser la zone de geocast ($L = 2 * R = 400m$). La courbe $E[D]$ quant à elle, montre que le retard moyen au niveau d'un feu de signalisation augmente en augmentant la charge ρ et devient très grand quand ρ dépasse une charge de 1. Notons enfin que la courbe du temps de séjour moyen $E[S]$ a la même allure que celle de $E[D]$ vue qu'elle représente la somme du retard moyen $E[D]$ et du temps de parcours moyen $E[M]$ (une constante).

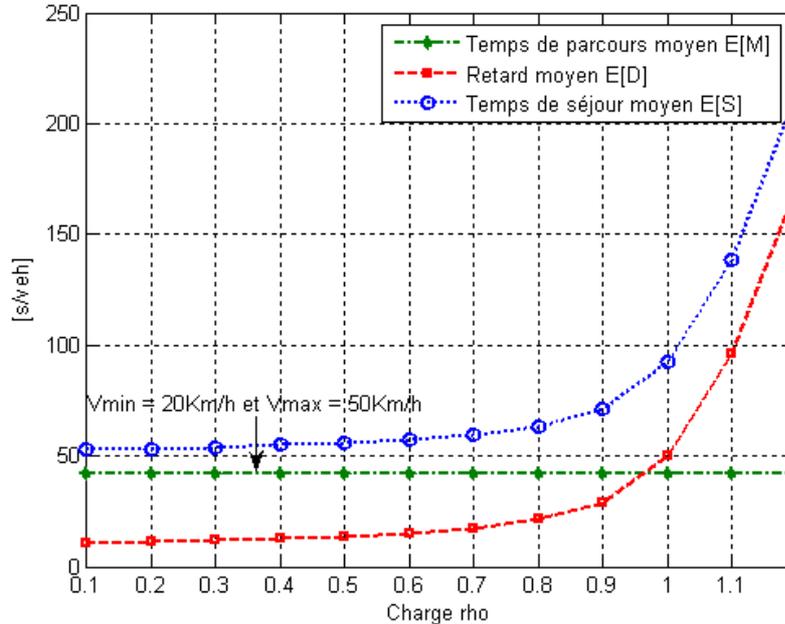


Figure 5.14 : Retard moyen, temps de parcours moyen et temps de séjour moyen vs Charge ρ .

Dans ce qui suit, nous allons utiliser la courbe $E[S] = f(\rho)$ pour estimer le nombre moyen de copies du même message reçu en fonction de la charge ρ et la période de diffusion T . En effet,

pour une charge ρ_i donnée, il suffit d'évaluer le temps de séjour moyen correspondant et de le diviser par la période de diffusion souhaitée pour déduire le nombre de copies reçues.

La figure 5.15 compare les résultats des simulations en termes de nombre moyen de copies du même message reçu par un véhicule aux résultats obtenus via le modèle analytique du temps de séjour moyen. Nous remarquons que les courbes ont la même allure et que l'estimation analytique est assez proche de la simulation pour les deux charges de trafic considérées. Ceci permet d'une part de valider notre approche analytique, et d'autre part, de confirmer le fait que les variations obtenues dans les résultats de simulations sont dues principalement à la variation du temps de séjour des véhicules au niveau de la zone de geocast.

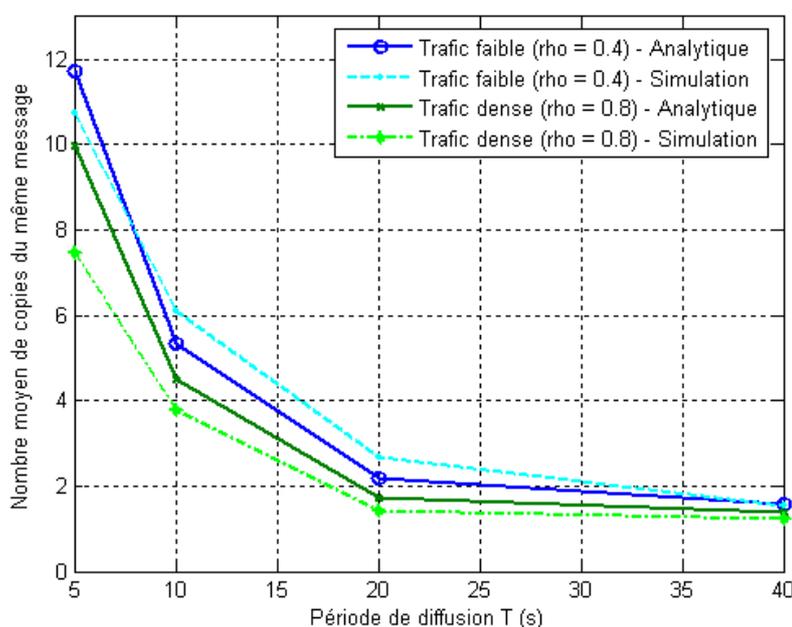


Figure 5.15 : Nombre moyen de copies du même message vs Période de diffusion T (simulation - analytique)

5.6.2 Analyse de la probabilité d'échec

Comme mentionné ci-avant (dans la section 5.4), le mécanisme GVI proposé définit un algorithme d'élection d'un véhicule diffuseur à des instants de diffusion intervenant périodiquement. Cet algorithme comprend deux étapes : (i) une première étape de sélection des véhicules candidats, et (ii) une deuxième étape d'élection du véhicule diffuseur parmi la liste des véhicules candidats. Toutefois, cette stratégie d'élection peut échouer dans le cas particulier où aucun véhicule ne se trouve dans la zone de notification A_i lors de la dernière diffusion locale. Bien évidemment, ceci dépend principalement des conditions du trafic routier et du choix de la

période de diffusion. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'étude de cette probabilité d'échec en fonction du débit d'arrivée au niveau du carrefour et ceci, pour certaines valeurs du temps de référence T .

Nous rappelons que parmi tous les véhicules qui viennent de recevoir un paquet de données D suite à une diffusion locale, il y a seulement ceux qui se trouvent au niveau de la zone de notification A_i et qui sont éligibles d'atteindre la zone B_i qui peuvent s'attribuer le statut de véhicule candidat (voir figure 5.3). Parmi ces véhicules candidats, il y a ceux qui sont entrain de circuler dans la voie où le feu de signalisation correspondant est dans la phase verte, et ceux qui sont en attente car le feu est rouge. Ces derniers (les voitures en attente) peuvent garder leur statut de véhicule candidat à condition qu'ils soient équipés par des moyens leur permettant de connaître la durée du feu rouge résiduelle. Cette information étant difficile à obtenir, nous supposons dans la suite de cette étude analytique que les véhicules participant au mécanisme GVI ne peuvent pas déterminer la durée du feu rouge résiduelle à tout instant, et par conséquent, seul les voitures en circulation¹⁴ peuvent se porter candidats.

Si on se place maintenant au bord d'une voie, et que l'on mesure le temps qui sépare l'arrivée de deux véhicules successifs, on s'aperçoit assez logiquement que cette variable est distribuée.

Dans la section 4.4 du chapitre 4, nous avons vu que si on suppose une distribution Poissonienne des arrivées de paramètre λ , et que les véhicules se déplacent avec une vitesse moyenne V_m , on peut facilement montrer que:

- la distribution de la distance d entre des véhicules suit une loi exponentielle de paramètre $\beta = \lambda/V_m$:

$$f(d) = \beta \exp(-\beta \cdot d) \quad (5.14)$$

où β représente la densité du trafic exprimé en [veh/km].

- et que la probabilité d'avoir i véhicules entre $[x, x+dx]$ suit une loi de poisson de paramètre $\beta \cdot dx$.

$$P_i = \frac{\exp(-\beta \cdot dx) \cdot (\beta \cdot dx)^i}{i!} \quad (5.15)$$

¹⁴ Cette hypothèse reste vraie uniquement lorsqu'on considère des valeurs du temps de référence T pas assez grandes (inférieure au temps moyen mis par un véhicule pour traverser la zone de notification A_i)

Donc, pour qu'il n'y ait personne d'éligible pour un sens donné, cela signifie qu'il n'y a aucun véhicule entre le centre de la zone de diffusion C_i et le périphérique de la zone de notification A_i . En d'autres termes, suite à la dernière diffusion locale, il y a zéro véhicules entre $[0, R/2]$ où R désigne le rayon de transmission d'un véhicule.

On obtient alors :

$$P_r[\text{personne dans un sens pour relayer le message}] = P_0 = \exp(-\beta.R/2) \quad (5.16)$$

Pour tenir compte des deux sens de la circulation, on élève au carré :

$$P_r[\text{échec}] = \exp(-\beta.R/2) * \exp(-\beta.R/2) = \exp(-\beta.R) \quad (5.17)$$

où $\beta = \lambda/V_m$

La figure 5.16 représente la probabilité P d'avoir une rupture (aucun candidat pour l'élection du véhicule diffuseur) en fonction du débit d'arrivée λ (nombre moyen de véhicules par seconde). La portée radio R d'un véhicule est fixée à 200m et la vitesse moyenne de circulation est égale à 10m/s. Conformément à la figure, la probabilité d'échec décroît rapidement pour atteindre la valeur de 1.83% pour un débit d'arrivée de 0.2 veh/sec et elle devient presque nulle quand le débit d'arrivée dépasse 0.3veh/sec. Ceci montre que l'algorithme d'élection du véhicule diffuseur peut échouer uniquement lorsque la densité du trafic routier est extrêmement faible.

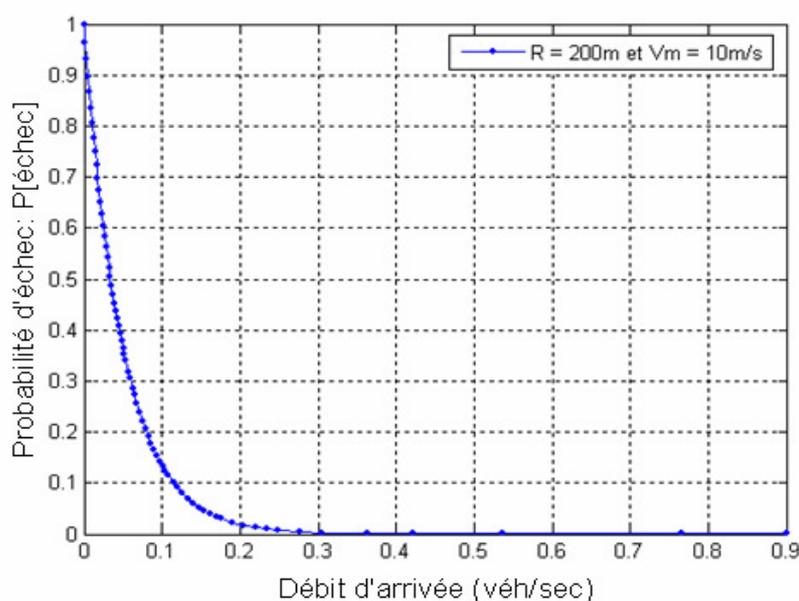


Figure 5.16 : Probabilité d'échec en fonction du débit d'arrivée.

5.7 Discussion

Le mécanisme GVI (*Geo-localized Virtual Infrastructure*) que nous proposons permet d'émuler le fonctionnement d'une infrastructure classique destinée à diffuser localement des paquets de données de manière périodique. Un tel mécanisme est très utile pour certaines applications de réseaux de véhicules :

- GVI peut jouer le rôle d'un spot d'information [96] installé dans des lieux à fort passage. Dans ce cas, il permettra de diffuser des annonces publicitaires géo-stationnaires, sans l'aide d'aucune infrastructure et dans un rayon de plusieurs centaines de mètres autour de l'annonceur. Les annonceurs peuvent être les commerçants (hôtels, restaurants, boutiques) ou la ville (diffusion d'informations touristiques, événements, etc...).

- Dans le chapitre 3, nous avons proposé IFTIS, un mécanisme d'estimation du trafic routier dans un environnement urbain. Plus précisément, le mécanisme IFTIS permet d'estimer la densité d'un tronçon de route entre deux intersections, d'une manière distribuée, moyennant des paquets d'agrégation échangés entre les véhicules. Le mécanisme GVI pourrait être utilisé pour diffuser périodiquement ces données de trafic au niveau des intersections pour informer en temps réel les usagers des voies de circulation de la fluidité du trafic/ les conditions de circulation et leurs permettre ainsi de prendre les bonnes décisions à savoir changer d'itinéraire, s'abstenir de circuler, modifier leurs horaires, etc...

- Les auteurs de [86] et [87] ont proposé des approches de dissémination d'une alerte générée par un véhicule accidenté sur une autoroute afin de permettre aux autres conducteurs d'éviter des freinages brusques ou même des accidents. Cependant, ces travaux se focalisent sur la diffusion de l'alerte au voisinage de l'accident. Il est aussi important d'enregistrer virtuellement une telle alerte autour des entrées d'autoroute de telle façon que les autres automobilistes qui accèdent à l'autoroute puissent recevoir l'alerte et prendre ensuite leurs précautions ou changer leur itinéraire pour éviter la congestion.

Notons enfin que le mécanisme GVI permet aussi de répondre aux besoins des protocoles de dissémination existants [90] en termes d'infrastructure tout en évitant le coût d'installation et de maintenance de tels équipements (répéteurs).

5.8 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons proposé GVI, un mécanisme qui permet d'émuler une infrastructure diffusant des données de manière périodique de sorte que tous les véhicules qui circulent au niveau de la zone de diffusion reçoivent les paquets de données. Ce mécanisme est particulièrement bien adapté à un environnement urbain vu la grande densité de voitures au niveau des intersections. Par conséquent, une intersection qui intègre le mécanisme GVI peut être considérée comme une zone de geocast à l'intérieur de laquelle les données sont stationnaires. GVI permet ainsi de fournir une multitude de services informatifs pour les passagers ou le conducteur (spot d'information, conditions de trafic, etc...)

Le mécanisme proposé définit un algorithme d'élection d'un véhicule diffuseur à des instants de diffusion intervenant périodiquement. Cet algorithme comprend deux étapes : (i) une première étape de sélection des véhicules candidats, et (ii) une deuxième étape d'élection du véhicule diffuseur parmi la liste des véhicules candidats. En conséquence, GVI permet de désigner un véhicule unique responsable de la diffusion du paquet de données dans une zone géographique, évitant ainsi de surcharger inutilement la bande passante du réseau véhiculaire ad-hoc par de multiples émissions.

Nous avons montré via les simulations qu'en changeant la période de diffusion T , on peut avoir une sorte de compromis entre la probabilité d'informer un véhicule (qui est une mesure de qualité de service) et le nombre moyen de copies du même message reçu (qui est une mesure de coût pour fournir le service).

Comme perspectives à ce travail, il serait intéressant d'intégrer un mécanisme de gestion de fiabilité à la solution GVI afin de pouvoir l'utiliser pour des applications de sécurité routière telles que l'UICWS (*Urban Intersection Collision Warning System*) [97]. Par ailleurs, d'autres études analytiques peuvent être menées afin de prolonger l'effort de compréhension de l'impact du temps de séjour des véhicules sur les performances du système. De nouveaux protocoles de dissémination peuvent également être proposés utilisant le mécanisme GVI.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusion Générale

Les réseaux de véhicules et les systèmes de transport intelligents n'en sont qu'à leurs balbutiements. A terme, ce domaine révolutionnera notre vie quotidienne. En effet, le faible coût de ces technologies de communications devrait provoquer une révolution économique. Les premiers véhicules équipés de capacités de communication Wifi et de localisation arrivent déjà sur le marché. Aucun constructeur automobile mondial n'échappe à cette frénésie, tant l'enjeu semble important. Les opérateurs télécoms sont en revanche un peu plus timides. Néanmoins, nous avons cité dans le chapitre 2 quelques tentatives. Un exemple est celui d'Orange qui a conçu un prototype "l'Orange Car Box", un PC communicant embarqué dans une voiture qui permet de naviguer en haut débit (3G, Wifi, Edge ou le GPRS) via un écran tactile ergonomique de 7 pouces et d'un clavier virtuel.

Le futur de ces réseaux, nous le voyons hybride : une combinaison des principales configurations V2V et V2I dans laquelle les véhicules communiquent non seulement entre eux de manière autonome, mais aussi avec l'infrastructure fixe sur un ou plusieurs sauts.

6.2 Travaux Réalisés

Dans ce contexte, cette thèse s'est plus précisément intéressée aux problématiques des communications réseaux dans les systèmes ITS. Notre objectif a été de proposer des mécanismes et des protocoles de communication qui soient adaptés aux caractéristiques de ces réseaux de véhicules et aux applications ciblées.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principaux concepts, spécificités et challenges liés aux réseaux de véhicules. Nous avons également présenté la dynamique autour de ce type de réseaux. Ceci nous a permis d'avoir un aperçu et une vue générale sur l'état actuel de cette nouvelle technologie de réseaux sans fil avec une vision sur les futures avancées qu'elle est amenée à connaître, mais surtout d'assimiler les bases nécessaires qui permettent de comprendre le fonctionnement et les mécanismes de bases des réseaux véhiculaires.

Ensuite, nous avons apportés quelques solutions à certains challenges et problèmes liés aux communications inter-véhicules dans un environnement urbain, et plus précisément à la problématique de routage et de dissémination dans la partie ad hoc du réseau de véhicules. Notre démarche a consisté à prendre en compte un paramètre clé qui influence le bon fonctionnement du réseau ad hoc de véhicules; à savoir la densité du réseau.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'estimation de la densité du trafic routier dans un environnement urbain. Nous avons proposé un mécanisme distribué appelé IFTIS. Notre approche consiste à faire circuler un même paquet d'agrégation entre des groupes de voitures, tout au long d'un tronçon découpé en un ensemble de cellules adjacentes. Ce paquet permet de collecter l'intégralité des données de densité du trafic disponibles sur la voie de circulation. Un tel mécanisme permet de caractériser de manière plus fine la densité de trafic du tronçon en fournissant une distribution spatiale des véhicules mobiles sur la voie de circulation. Nous avons validé cette approche en utilisant l'outil de simulation QualNet dans différents scénarios de trafics et de mobilité. Les résultats obtenus montrent la pertinence des données obtenues grâce à notre mécanisme.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à la problématique du routage dans les réseaux de véhicules. Nous avons proposé un nouveau protocole de routage multi-sauts appelé GyTAR, adapté aux réseaux véhiculaires dans un environnement urbain. GyTAR tire partie des caractéristiques des voies urbaines et intègre le mécanisme d'estimation de densité de trafic IFTIS pour le routage des paquets. Il permet de répondre aux besoins des applications des réseaux de véhicules qui nécessitent l'établissement d'une communication point à point (unicast). Son principe est basé sur (i) un choix optimal des intersections par lesquelles un paquet doit passer pour atteindre le nœud destination et (ii) une approche gloutonne améliorée pour router les paquets entre deux intersections. L'étude des performances de la solution montre son efficacité en termes de délai de bout en bout, fiabilité et surcharge de contrôle, comparée à d'autres protocoles de routage (LAR et GSR).

Un autre volet de la thèse traite de la dissémination des données dans les réseaux de véhicules, et plus précisément, de la géo-diffusion au niveau des intersections d'un environnement urbain (endroits à forte densité de véhicules). Nous avons proposé un mécanisme appelé GVI qui permet d'émuler une infrastructure diffusant des données de manière périodique de sorte que tous les véhicules qui circulent au niveau de la zone de geocast reçoivent les paquets de données. Son principe repose sur l'idée d'élire un véhicule diffuseur par cycle qui diffusera le paquet de

données lorsque ce dernier se trouvera au voisinage du centre de la zone de geocast (centre de l'intersection). GVI a été validé à travers des simulations et des études analytiques et nous avons montré qu'une telle approche était réaliste pour remplacer une infrastructure fixe laquelle serait coûteuse à mettre en place et à maintenir.

6.3 Perspectives

Dans la continuité du travail présenté, nous pourrions approfondir notre étude afin d'améliorer les résultats obtenus.

L'une des premières perspectives du travail présenté ici concerne l'extension du mécanisme IFTIS afin de mettre en place un système de gestion de trafic et de détection d'embouteillage dans un environnement urbain. En effet, le mécanisme proposé permet de caractériser de manière fine la densité de trafic d'un tronçon de route et de détecter un éventuel embouteillage. Il serait intéressant de fournir une telle information aux automobilistes des autres voies de circulation. Pour ce faire, il est nécessaire d'intégrer un mécanisme de dissémination de données à notre approche, capable de diffuser l'information dans un rayon de quelques kilomètres.

La seconde perspective que nous avons pu identifier concerne notre proposition de routage GyTAR. Il serait intéressant d'étudier ses performances dans d'autres réseaux à connectivité intermittente en dehors des VANETs. En particulier, il serait intéressant d'évaluer notre protocole de routage dans des réseaux où les entités mobiles sont connectées entre elles par intermittence, tels que les réseaux tolérants aux délais (DTNs).

Un autre aspect qui pourrait prolonger les travaux de cette thèse serait l'intégration d'un mécanisme de gestion de fiabilité à notre approche de diffusion géo-localisée GVI afin de pouvoir l'utiliser pour des applications de sécurité routière. Par ailleurs, d'autres études analytiques peuvent être menées dans l'optique de prolonger l'effort de compréhension de l'impact du temps de séjour de véhicules sur les performances du système.

Annexe 1

EXPERIMENTATIONS SUR ROUTE AVEC LA TECHNOLOGIE IEEE 802.11

1.1 Introduction

Afin d'étudier les performances de la norme IEEE 802.11 et de mieux appréhender les différents problèmes qui surviennent lors de la communication inter véhicules, nous avons procédé à de nombreux tests en condition réelle. Pour ce faire, nous avons mis en place notre propre plateforme de test CARMAN (*CAR-based Mobile Ad hoc Network*). Cette plateforme est assez générique et permet de réaliser des tests sur route sur des réseaux de deux à six voitures, et de procurer les métriques permettant de valider ou non les scénarios de tests réalisés (e.g., qualité du signal pour chaque trame émise sur chaque noeud, mesure du bruit, distance entre véhicules, vitesse et direction des véhicules, taux de perte, débit mesuré, quantité des données reçues, durée de connexion, gigue, temps d'aller retour).

1.2 Description de la plate-forme Carman

Lors des expérimentations, nous avons utilisé des voitures équipées du matériel présenté dans la figure A1.1. La plateforme Carman (*CAR-based Mobile Ad hoc Network*) fonctionne sous Linux et a été testé sur plusieurs distributions. Il faut noter que la version du pilote madwifi a été modifiée afin de permettre la capture d'informations avancées telles que la qualité du signal et le niveau de bruit. Plusieurs logiciels sont indispensables au fonctionnement de la plateforme tels que le logiciel Iperf pour la génération de trafic réseau TCP ou UDP, VideoLan pour la visualisation et la diffusion des vidéos, GNU Plot pour la création de courbes de résultats, etc...



Figure A1.1 : Matériel utilisé.

La figure A1.2 permet de visualiser l'architecture de Carman. Cette architecture met en exergue les trois modules de cette plate-forme à savoir (i) un module pour la configuration de la plate-forme qui permet de charger les modules madwifi, de fixer les paramètres du réseau et de synchroniser les temps GPS/PC, (ii) un module pour l'acquisition des données qui est assez simple d'utilisation car le conducteur du véhicule peut aussi l'utiliser et enfin (iii) un module qui permet d'analyser les données capturées.

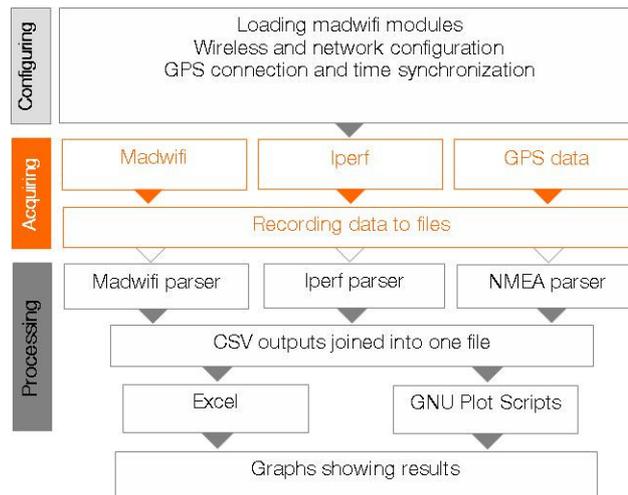


Figure A1.2 : Architecture de Carman.

Au lancement du module d'acquisition des données, les différentes informations sont enregistrées dans des fichiers de logs. Au cours des expériences, les informations concernant les différentes métriques telles que le taux de perte et la qualité de signal sont affichées comme le montre la figure A1.3.

Dans le module d'analyse des données capturées, nous avons développé quatre analyseurs de trace (pour GPS, madwifi, Iperf et ping). Un script global a été créé pour appeler l'ensemble des analyseurs et fusionner les résultats. Ensuite le tracé des courbes est effectué grâce à GNU Plot.

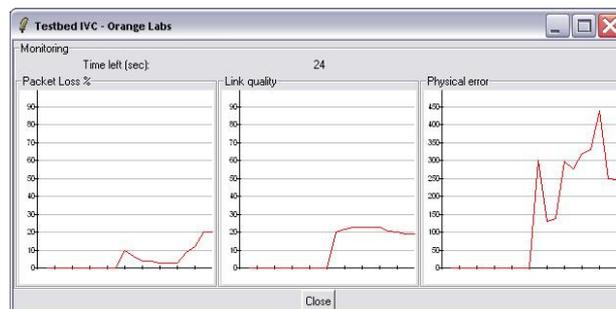


Figure A1.3 : Interface du moniteur.

1.3 Scénarios des tests

Les scénarios de tests envisagés ont pour but de couvrir le maximum des situations réelles. Nous allons évoquer les plus pertinents d'entre eux.

1.3.1 Scénarios V2V

Le premier scénario est le croisement de deux véhicules mobiles comme le montre la figure A1.4 (a) nous avons fait le test à faible vitesse 30 km/h et à vitesse modérée 50 km/h.

Le scénario de dépassement consiste au croisement de deux véhicules dont un est immobile (cf. figure A1.4 (b)). C'est une situation assez courante notamment dans les carrefours.

Le scénario d'accélération consiste à côtoyer deux véhicules puis faire accélérer l'un d'entre eux. Ceci permet de voir l'influence de l'accélération sur la communication.

Le scénario du simple saut est un scénario à trois véhicules qui permet de voir l'influence du passage par un noeud intermédiaire (cf. figure A1.4 (c)). Cette expérience a été faite avec des véhicules immobiles puis en mouvement avec deux vitesses prédéterminées (50 km/h et 90 km/h).

Le dernier scénario V2V testé est un scénario à six véhicules (cf. figure A1.4 (d)). Ce scénario permet d'étudier le comportement des communications utilisant quatre relais. Le choix des relais est préfixé grâce à l'affectation de routes statiques.

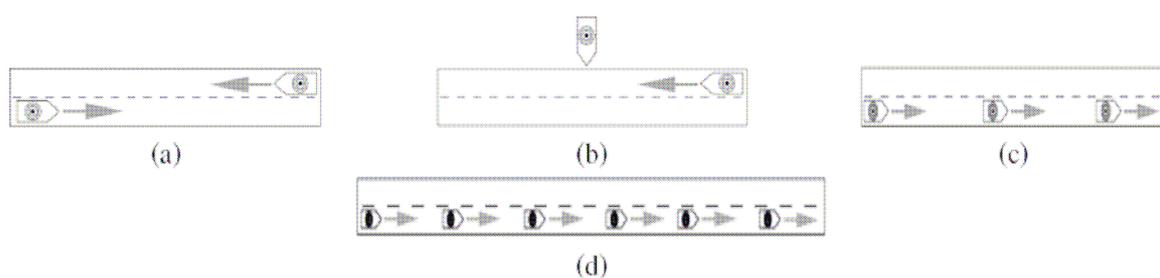


Figure A1.4 : (a) Croisement de deux véhicules, (b) Scénario de dépassement, (c) Scénario à trois véhicules, (d) Scénario à 6 véhicules.

1.3.2 Scénarios I2V

Ces scénarios sont très importants et concernent le cas d'une infrastructure fixe proposant des services à des automobilistes/passagers dans une ville ou sur une autoroute. Le scénario testé est basé sur une borne statique située sur un pont alors qu'un véhicule circule sur une voie express passant en dessous. La borne émet des données de façon continue avec un débit maximal. Le

véhicule, ne connaissant pas le canal d'émission de la borne, est obligé de le découvrir via une recherche. Le but est de s'approcher au maximum des conditions réelles.

1.3.3 Scénario hybride

Ce scénario a pour objectif d'étendre la couverture d'une borne et représente un scénario hybride des deux précédents. Pour mettre en place ce scénario, la borne émettrice est située sur un pont alors que deux véhicules suffisamment proches pour pouvoir communiquer empruntent la voie express passant en dessous (cf. figure A1.5). Au début, la borne se connecte directement au premier véhicule et lui envoie les données. Lorsque celui-ci devient hors de sa portée, la borne tente de faire relayer les données par le second véhicule.



Figure A1.5: Scénario hybride à deux véhicules.

1.4 Résultats obtenus et analyses

1.4.1 Expériences V2V

Les résultats des scénarios V2V avec deux voitures sont illustrés par la figure A1.6 (dépassement et croisement). Grâce à ces scénarios, nous avons pu voir que la distance entre l'émetteur et le récepteur influe sur la qualité du signal et le taux de perte. Nous avons également pu constater que la vitesse affecte peu les performances des communications entre deux véhicules.

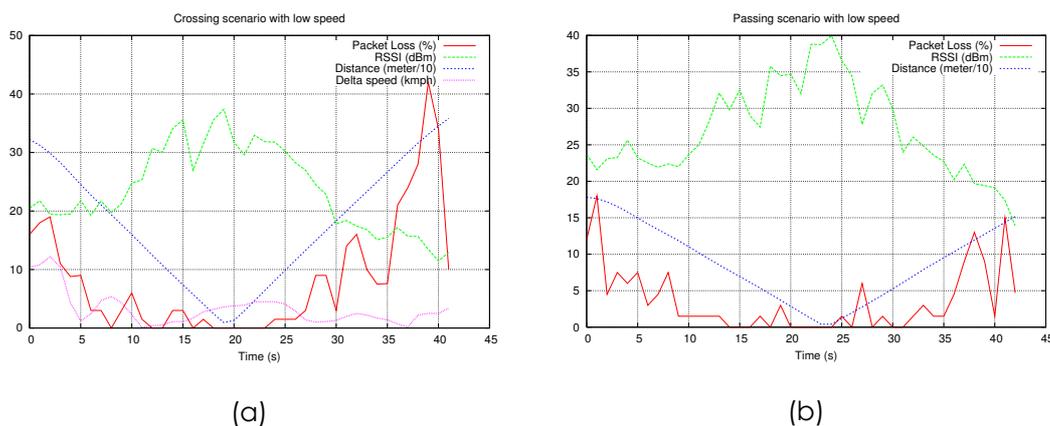


Figure A1.6 : Scénario de croisement (a) et de dépassement (b) à petite vitesse.

La figure A1.7 montre un résumé des statistiques des premières expériences multi-sauts avec 3 voitures (statique et en suivi). En comparant les pertes moyennes obtenues et le délai d'aller-retour en petite ou grande vitesse, nous pouvons conclure que la vitesse affecte peu les performances des communications multi-sauts. On constate que les pertes dans le scénario de suivi sont inférieures au scénario statique malgré la mobilité de noeuds. Cette différence provient de l'environnement car sur autoroute, il n'y a ni obstacle ni interférence avec d'autres systèmes radios.

	Pertes moy (%)	RTT moy (ms)	Distance inter- vehicule (m)
Scénario statique	4,75	4,41	87,17
Scénario de suivi (PV)	1,99	1,97	91,39
Scénario de suivi (GV)	3,48	2,04	142,05

Figure A1.7 : Résumé des statistiques des scénarios V2V.

La figure A1.8 résume les statistiques obtenues lors de la chaîne de communication de 6 véhicules, c'est-à-dire en utilisant 4 relais. Le taux de perte est de 15,69% de bout en bout soit environ 3,5% de perte par émission. En effet, les pertes augmentent avec le nombre croissant de sauts radio. Ce phénomène s'explique par l'utilisation du mécanisme CSMA et par le problème de station cachée (mécanisme RTS/CTS désactivé).

Distance inter véhicule m	71,93
Distance Total m	359,64
Vitesse km/h	78,69
Débit effectif kbps	252,67
Débit émetteur kbps	300
Taux de perte %	15,69
RTT ms	7,99
RSSI	42,71
Bruit dB	-98,79

Figure A1.8 : Moyenne des métriques de la chaîne de 6 véhicules.

1.4.2 Expériences V2I

Pour ces expérimentations, nous nous sommes focalisés sur les métriques suivantes : la puissance du signal, le taux de perte, la durée de connexion au réseau et le total de données reçues. Nous avons exécuté plusieurs fois les essais menant à des résultats semblables. La figure A1.9 représente la perte de paquet et le RSSI pour le scénario simple avec un véhicule et un point d'accès (a) et pour le scénario hybride avec deux véhicules et un point d'accès (b). L'impact des ponts est clairement visible.

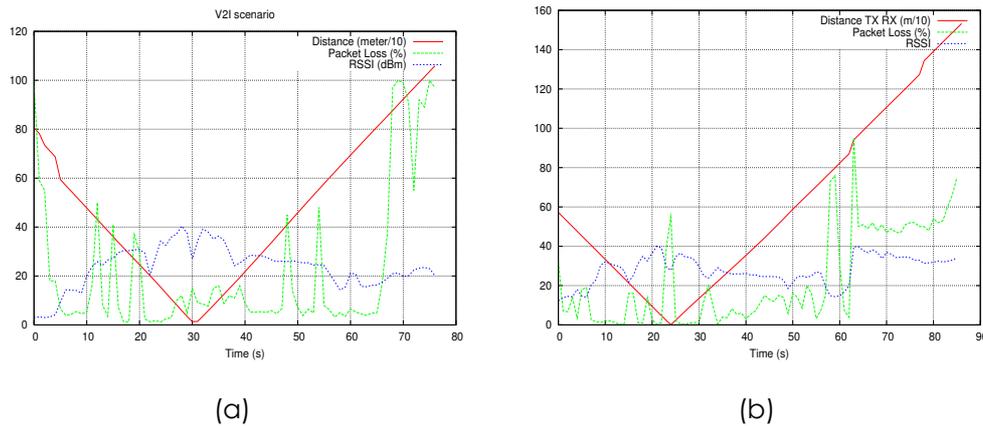


Figure A1.9 : Taux de perte et RSSI pour le scénario simple (a) et hybride (b) (grande vitesse).

La figure A1.10 montre le temps de connexion et la quantité de données transférées pour les deux derniers scénarios simple et hybride. Les résultats expérimentaux ont révélé la faisabilité du réseau ad hoc pour étendre la zone de couverture des points d'accès. Le réseau ad hoc accroît ainsi la durée de connexion pour des voitures en mouvement de plus de 16%. Il augmente également la quantité de données que la voiture peut recevoir de plus de 10%.

	Temps de connexion		Quantité de données	
	Grande vitesse	Petite vitesse	Grande vitesse	Petite vitesse
Total	81	140	59.195	98.86

(a)

	Temps de connexion		Quantité de données	
	Grande vitesse	Petite vitesse	Grande vitesse	Petite vitesse
Direct	66	143	54.247	106.452
Multihop	25	27	9.813	9.519
Total	91	170	64	116

(b)

Figure A1.10: Durée de connexion (en secondes) et quantité de données (en méga-octets) transférées dans le scénario simple (a) et hybride (b).

Annexe 2

LE WAVE OU L'IEEE 802.11P

2.1 Introduction

Pour communiquer de véhicule à véhicule au sein d'un peloton, l'ASTM (*American Society for Testing and Materials*) a adopté en 2002 une norme sans-fil appelée DSRC (*Dedicated Short Range Communication*). En 2003, le groupe de travail IEEE a repris ces travaux pour définir un nouveau standard dédié aux communications inter-véhicules, nommé WAVE (*Wireless Ability in Vehicular Environments*) et aussi connu sous le nom de IEEE 802.11p. Cette norme utilise le concept de multi-canaux afin d'assurer les communications pour les applications de sécurité et les autres services du Transport Intelligent.

Nous présenterons dans ce qui suit la couche physique sur laquelle s'appuie le protocole WAVE puis la couche MAC (*Medium Access Control*) dont le but est d'apporter de la qualité de service et de gérer les priorités au sein de WAVE.

2.2 La couche physique du WAVE

La couche physique de WAVE est dérivée de l'IEEE 802.11a. Elle est capable d'offrir un débit entre 6 et 27 Mbps (pour des distances jusqu'à 1000 mètres) avec une modulation de type OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Cette couche physique s'appuie sur 7 canaux de communication d'une longueur de 10 Mhz, chacun se trouvant dans la zone des 5.9Ghz (voir figure A2.1). Cette bande de fréquence est définie en Europe et aux Etats-Unis par l'ETSI et le FCC respectivement.

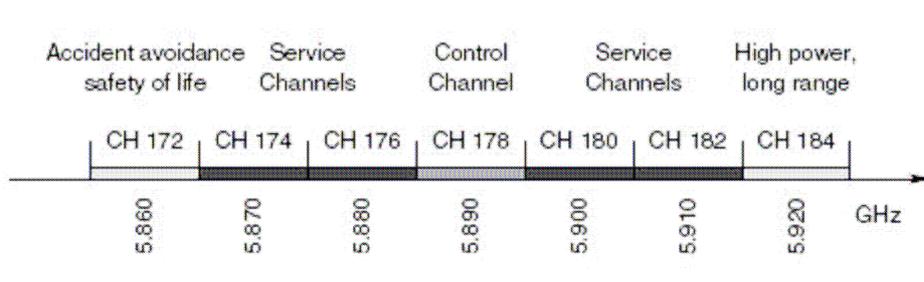


Figure A2.1 : Les canaux disponibles pour l'IEEE 802.11p.

L'ensemble de ces canaux se répartissant fonctionnellement en 1 canal de contrôle et 6 canaux de service. Le canal de contrôle est réservé à la transmission des messages de gestion du réseau et des messages de très haute priorité à l'instar des certains messages critiques liés à la sécurité routière. Les 6 autres canaux sont quant à eux dédiés à la transmission des données des différents services annoncés sur le canal de contrôle.

Notons enfin qu'un nœud ne peut pas les utiliser simultanément, mais il peut les alterner. En effet, comme le protocole doit permettre l'unicast et le multicast, les différents canaux ne peuvent être utilisés simultanément, néanmoins, chaque station alterne continuellement entre le canal de contrôle (Control Channel: CCH) et un des canaux de services (Service Channel : SCH) ou le canal de sécurité. Afin de respecter les exigences de sécurité (évitements des collisions) une période contenant un CCH et un SCH ne devra pas prendre plus de 100ms.

2.3 La couche MAC

La couche MAC du protocole WAVE est identique à celle présente dans le protocole 802.11e dont l'extension concerne la qualité de service (*Enhanced Distributed Channel Access Quality of Service extension*):

Les messages sont rangés dans 4 classes d'accès différentes (*Access Classes AC*) chacune ayant sa propre priorité (voir figure A2.2) : AC0 ayant la priorité la plus basse et AC3 la plus élevée. De plus chacune de ces classes disposent d'une file d'attente. Ainsi, un paquet arrivant dans l'une de ces files ne sera pas envoyé immédiatement, il devra quoi qu'il arrive attendre un temps minimum dans cette file, ce temps étant fixé par ses paramètres de contention.

Le temps minimum qu'un paquet devra attendre est déterminé de la façon suivante (figure A2.3) : il est égal à la somme de:

- l'AIFS (*Arbitration Inter-Frame Space*) qui comme le nom l'indique est une durée d'attente fixée et dépendant de la classe (9 périodes de 16 μ s pour la classe AC0 et 2 périodes pour la classe AC3)
- et de la fenêtre de contention CW (*Contention Window*) qui est une valeur aléatoire prise entre 0 et CWmin (dépendant de la classe)

Une fois ce temps attendu le paquet est envoyé, si une collision survient la transmission est retentée en utilisant une CW augmentée de $2(CW+1)-1$. Cette augmentation continue jusqu'à ce que le paquet soit:

- transmis
- que la valeur de CW atteint CWmax (dépendant également de la classe)
- que le nombre maximal d'essais atteint la limite fixée (7 tentatives)

AC	CWmin	CWmax	AIFS	t_w
0	aCWmin	aCWmax	9	264 μ s
1	$\frac{aCW_{min}+1}{2} - 1$	aCWmin	6	152 μ s
2	$\frac{aCW_{min}+1}{4} - 1$	$\frac{aCW_{min}+1}{2} - 1$	3	72 μ s
3	$\frac{aCW_{min}+1}{4} - 1$	$\frac{aCW_{min}+1}{2} - 1$	2	56 μ s

Figure A2.2 : Paramètres de contention pour le canal de contrôle.

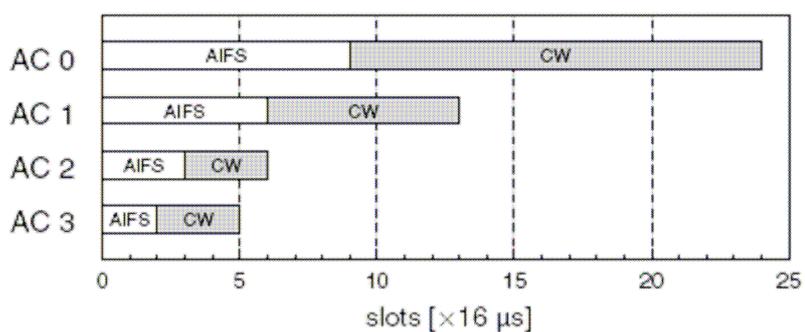


Figure A2.3 : Temps d'attente pour les catégories d'accès en fonction de la contention.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. Kiess, J. Rybicki, M. Mauve. "On the nature of Inter-Vehicle Communication", *WMAN 2007: Proceedings of the 4th Workshop on Mobile Ad-Hoc Networks*, pp. 493-502, Bern, Switzerland, March 2007.
- [2] J. Luo and J.-P. Hubaux. A survey of inter-vehicle communication. Technical report, EPFL, Lausanne, 2004.
- [3] P. Mühlethaler. 802.11 et les réseaux sans fil. Eyrolles, 2002.
- [4] G. Pujolle. Les réseaux sans fil et l'Internet ambiant. In *DNAC 2003*, 17 pages, Paris, France, 2003.
- [5] Standard for Information technology_Telecommunications and information exchange between systems_Local and metropolitan area networks_Specific requirements Part 15.1 : Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs). New York, 2002.
- [6] P 802.11 Draft Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. New York, 1997.
- [7] IEEE Standard 802.16-2004 : IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16 : Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. New York, 2004.
- [8] Vehicle Safety Communications (VSC) Projects, http://www.car-to-car.org/fileadmin/dokumente/pdf/security_2006/sec_06_04_laberteaux_CAMP.pdf.
- [9] Collision Avoidance Metrics Partnership – CAMP (US), http://www.its.dot.gov/cicas/cicas_current_act.htm.
- [10] Car-to-car communication consortium C2C-CC, <http://www.car-to-car.org>.
- [11] Advanced Safety Vehicle (ASV) Program, http://www.its-lectures.ac.keio.ac.jp/2001/2001_eb_45.htm.
- [12] Vehicle Infrastructure Integration - VII, <http://www.its.dot.gov/vii/>.
- [13] Hannes Hartenstein, Kenneth P. Laberteaux, "A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks", *IEEE Communications Magazine*, pp.164-171, June 2008.
- [14] Forum of European National Highway Research Laboratories - FEHRL, <http://www.fehrl.org/>
- [15] Andreas Festag, "Vehicular Ad Hoc Networks Research: Europe," IEEE Comsoc AHSNTC Newsletter, Volume 1, Number 1, 2008 (<http://ieeecomsoc.jot.com/WikiHome/AdHocTC/AHSNTC%20Newsletter/>).
- [16] Craig Pickering, "Vehicle Infrastructure Integration (VII) in the US – Enhancing Safety, Enabling Mobility", Panel session within the symposium *IEEE WiVec'2007*, September 2007.
- [17] Quasi-Zenith QZSS, http://qzss.jaxa.jp/index_e.html.
- [18] Microsoft - Helping Carmakers and Suppliers Drive Innovation, <http://www.microsoft.com/windowsautomotive/default.mspx>.
- [19] Vehicularlab, <http://www.vehicularlab.org>

- [20] Prevent, <http://www.prevent-ip.org/>
- [21] SafeSpot (Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety), <http://www.safespot-eu.org/>
- [22] Watch-Over, <http://www.watchover-eu.org/>
- [23] CVIS (Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems), <http://www.cvisproject.org/>
- [24] GST (Global Systems for Telematics), <http://www.gstforum.org/>
- [25] DRiVE (Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments), <http://www.ist-drive.org/index2.html/>
- [26] NoW (Network-on-Wheels), <http://www.network-on-wheels.de>
- [27] FleetNet project- Internet on the road, <http://www.et2.tuharburg.de/fleetnet>
- [28] SeVeCom (Secure Vehicular Communication), <http://www.sevecom.org/>
- [29] DSRC (Dedicated Short Range Communication), <http://www.leearmstrong.com/DSRC/DSRCHomeset.htm>
- [30] IEEE 802.11p Amendment, "Wireless Access in Vehicular Environments," v. D3.0, 2007, work in progress.
- [31] IEEE 1609 Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments; available from IEEE Standards.
- [32] Continuous Air-interface, Long and Medium Range - CALM, <http://www.calm.hu/>
- [33] J. Blum, A. Eskandarian and L. Hoffiman, Challenges of intervehicle ad hoc networks, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol. 5, No 4, December 2004, pp. 347-351.
- [34] M. Raya and J-P. Hubaux, « The Security of Vehicular Ad Hoc Networks », in the proceeding of *The Third ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks (SASN'05)*, Alexandria, VA, USA, Novembre 2005.
- [35] S. Butenko, X. Cheng, D.-Z. Du, and P. M. Pardalos. "On the construction of virtual backbone for ad hoc wireless networks. In Cooperative Control : Models, Applications and Algorithms", volume 1 of Cooperative Systems, chapter 3, pages 43_54. Kluwer Academic Publishers, January 2003.
- [36] M. Torrent-Moreno, D. Jiang, and H. Hartenstein, "Broadcast reception rates and effects of priority access in 802.11-based vehicular ad-hoc networks," in *Proceedings of ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks (VANET 2004)*, Philadelphia, USA, October 2004.
- [37] I. Broustis and M. Faloutsos, "Routing in Vehicular Networks: Feasibility, Modeling, and Security", in *International Journal of Vehicular Technology*, Volume 2008 (2008), Article ID 267513, 8 pages.
- [38] N. Wisitpongphan, O. Tonguz, J. Parikh, F. Bai, P. Mudalige, and V. Sadekar, "On the Broadcast Storm Problem in Ad hoc Wireless Network," *IEEE Wireless Communications*, 2007.
- [39] Y. Khaled, B. Ducourthial and M. Shawky, "A usage oriented taxonomy of routing protocols in VANET", *Workshop UBIROADS, co-located with IEEE GIIS*, Morocco, June 2007.
- [40] <http://www.traffic.com/>
- [41] <http://www.mapmechanics.com/>
- [42] L. Wischhof, A. Ebner, H. Rohling, M. Lott and R. Halfmann, "SOTIS – A Self-Organizing Traffic Information System" *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Apr. 2003.

- [43] T. Nadeem, S. Dashtinezhad, C. Liao and L. Iftode, "TrafficView: Traffic Data Dissemination using Car-to-Car Communication," in *ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, Jul. 2004.
- [44] Qualnet simulator, <http://www.scalable-networks.com>.
- [45] J. Haerri, M. Fiore, F. Filali, C. Bonnet, "VanetMobiSim: generating realistic mobility patterns for VANETs", *ACM Int. Wrkshp on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, Sept. 2006.
- [46] Network simulator-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [47] Opnet, <http://www.opnet.com/>
- [48] Omnet++, <http://www.omnetpp.org/>
- [49] Global Simulator Network, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>
- [50] D.B. Johnson and D.A. Maltz. « Dynamic source routing in ad hoc wireless networks ». *Mobile Computing*, Tomasz Imielinski and Hank Korth editors, Kluwer Academic Publishers, vol 353, p. 153-181, 1996.
- [51] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, « A survey of mobility models for ad hoc network research ». *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, p. 483–502, 2002.
- [52] A.K. Saha and D.B. Johnson. « Modeling Mobility for Vehicular Ad Hoc Networks ». *Poster in the First ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*, Philadelphia, Pennsylvania, Oct 2004.
- [53] J-Y. Le Boudec and M. Vojnovic, « Perfect Simulation and Stationarity of a Class of Mobility Models », *proceedings of IEEE Infocom 2005*, Miami, USA, 2005.
- [54] F.K. Karnadi, Z.H. Mo, and K.-C. Lany, « Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET », *in the proceedings of the Eleventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005)*, Cologne, Germany, Août -Septembre 2 2005.
- [55] SUMO Simulation of Urban MObility. <http://sumo.sourceforge.net>
- [56] D.R. Choffnes and F.E. Bustamante. « An Integrated Mobility and Traffic Model for Vehicular Wireless Networks », *In Proceedings. of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, Cologne, Germany, Septembre 2005.
- [57] CANU Project, <http://canu.informatik.uni-stuttgart.de>.
- [58] M. Gerla, X. Hong, and G. Pei, « Fisheye State Routing Protocol (FSR) for Ad Hoc Networks », *IETF Internet Draft*, draft-ietf-MANET-fsr -02.txt, Décembre 2001.
- [59] T. Clausen, P. Jacquet, « Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) », *IETF Request for Comments : RFC 3626*, Octobre 2003.
- [60] R. Ogier, F. Templin, M. Lewis, « Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF) », *IETF Request For Comments (RFC) 3684*, Février 2004.
- [61] D.B. Johnson, D.A. Maltz, Y-C. Hu, « The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR) », *Internet Draft : <draft-ietf-manetdsr-10.txt>*, 19 Juillet 2004.
- [62] C.E. Perkins, E.M. Belding-Royer, and S. Das, « Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing », *IETF RFC 3561*, 2003.
- [63] Y. T. Mingliang Jiang, Jinyang Li, « Cluster based routing protocol », *IETF Internet Draft*, draft-ietf-manet-cbrp-spec-01.txt, Juillet 1999.
- [64] The ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org>.

- [65] J. Li, J. Jannotti, D. De Couto, D. Karger, and R. Morris, "A scalable location service for geographic ad hoc routing", *In Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pages 120-130, 2000.
- [66] Z.J. Haas, B. Liang, Ad hoc mobility management with uniform quorum systems, *IEEE/ACM Trans. On Networking* 7 (2) (1999) 228–240.
- [67] I. Stojmenovic, Home agent based location update and destination search schemes in ad hoc networks, Technical report, Department of Computer Science, University of Ottawa, TR-99-10, 1999.
- [68] Y. Ko and N. Vaidya, « Locaton-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks », *in Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'98*, p. 66-75, Dallas, USA, Août 1998.
- [69] J. Navas and T. Imelinski, « Geocast - geographic addressing and routing », *in Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'97*, vol. 3, p. 66-76, Budapest, Hungary, Septembre 1997.
- [70] B. Karp and H. T. Kung, « Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks », *in Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'00*, Boston, USA, Août 2000.
- [71] R. Jain, A. Puri, and R. Sengupta, « Geographical routing using partial information for wireless ad hoc networks », *IEEE Personal Communications*, vol. 8, p. 48-57, Fév. 2001.
- [72] S-M Senouci, T. Mohamed-Rasheed, « Modified Location-Aided Routing Protocols for Control Overhead Reduction in Mobile Ad Hoc Networks », *Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility (NetCon 2005)*, Lannion, France, Novembre 2005.
- [73] H. Fuessler, M. Mauve, H. Hartenstein, M. Kaesemann, and D. Vollmer. A Comparison of Routing Strategies for Vehicular Ad Hoc Networks. Technical Report TR-02-003, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Mannheim, March 2002.
- [74] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, D. Herrmann, H. Füßler, M. Mauve, "A Routing Strategy for Vehicular Ad Hoc Networks in City Environments", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003)*, pp. 156-161, Columbus, OH, USA, June 2003.
- [75] C. Lochert, M. Mauve, H. Füßler, H. Hartenstein, "Geographic Routing in City Scenarios", *MobiCom 2004*.
- [76] B.-C. Seet, G. Liu, B.-S. Lee, C. H. Foh, K. J. Wong, K.-K. Lee, "A-STAR: A Mobile Ad Hoc Routing Strategy for Metropolis Vehicular Communications". *NETWORKING 2004*, 989-999.
- [77] F. Granelli, G. Boato, and D. Kliazovich, "MORA: a Movement-Based Routing Algorithm for Vehicle Ad Hoc Networks," *in Proc. of 1st IEEE Workshop on Automotive Networking and Applications (AutoNet 2006)*, San Francisco, USA, Dec. 2006.
- [78] Z. Mo, H. Zhu, K. Makki and N. Pissinou, "MURU: A Multi-Hop Routing Protocol for Urban Vehicular Ad Hoc Networks", *MobiQuitous 2006*.
- [79] Ducourthial, B., Khaled, Y. e Shawky, M., Conditional transmissions: Performance study of a new communication in VANET. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, November 2007.
- [80] J. Zhao and G. Cao. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. In *Proceedings of the 25th Conference on Computer Communications (INFOCOM06)*, 2006.
- [81] Inose, H. et al.: Road Traffic Management, Sangyo-Tosho, Tokyo, p.23 (1972) (in Japanese).

- [82] J. Davis, A. Fagg, and B. Levine, "Wearable Computers as Packet Transport Mechanisms in Highly-Partitioned Ad-Hoc Networks", in *International Symposium on Wearable Computing, October 2001*.
- [83] Y.C. Tseng, S.Y. Ni, Y.S. Chen, and J.P. Sheu. « The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network », *Wireless Networks*, 8(2/3), p. 153-67, 2002.
- [84] M.-T. Sun and al. Gps-based message broadcast for adaptive intervehicle communications. *VTTC Fall 2000*.
- [85] L. Briesemeister, L. Schäfers and G. Hommel: Disseminating Messages among Highly Mobile Hosts based on Inter-Vehicle Communication. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000*, pages 522–527, Piscataway, NJ, USA, October 2000.
- [86] Alshaer, H. and E. Horlait: An Optimized Adaptive Broadcast Scheme for Inter-vehicle Communication. In *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC2005-Spring)*, pages 2840– 2844, Stockholm, Sweden, May 2005.
- [87] Benslimane, A.: Optimized Dissemination of Alarm Messages in Vehicular Ad-hoc Networks (VANET). In *Proceedings of the 7th IEEE International Conference*, Toulouse, France, June 2004.
- [88] C. Lochert, B. Scheuermann, M. Caliskan, M. Mauve, "The feasibility of information dissemination in vehicular ad-hoc networks" - *IEEE WONS '07, Obergurgl, Austria, Jan. 2007*.
- [89] J. Nzoonta and C. Borcea, STEID: A protocol for emergency information dissemination in vehicular networks, Draft, 2006.
- [90] G. Korkmaz, E. Ekici, F. Özgüner, and Ü. Özgüner, "Urban multihop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems," in *VANET '04: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. Philadelphia, PA, USA: ACM Press, Sept. 2004, pp. 76–85.
- [91] Simulog. Qnap modelling tool. www.simulog.fr.
- [92] M. Rudack, M. Meincke and M. Lott: "On the Dynamics of Ad-Hoc Networks for Inter-Vehicle Communications (IVC)", *The 2002 International Conference on Wireless Networks ICWN 2002 (2002)*.
- [93] F. Webster, "Setting for fixed-cycle traffic signals", *Operation Research Quarterly*, Vol 14, pp. 373-386, 1958.
- [94] TRB, 1994. Highway Capacity Manual. Special Report 209, third ed., TRB, National Research Council, Washington.
- [95] A. Miller, "Setting for Fixed-cycle Traffic Signals", *Operation Research*, Vol. 14, n°4, pp. 373-386, December 1963.
- [96] R.H. Frenkiel, B.R. Badrinath, J. Borras, and R. Yates, "The Infostations Challenge: Balancing Cost and Uiquity in Delivering Wireless Data," in *IEEE Personal Communications*, April 2000.
- [97] H. Krishnan, C. Kellum, "Use of Communication in Vehicle Safety Application", Internal Report of General Motors Company, 2002.

LISTE DES PUBLICATIONS

A. BREVETS / PATENTS

- [P1] M. Jerbi, SM. Senouci, Y. Gourhant, Y. Ghamri-Doudane, "Procédé de diffusion de paquets de données dans un réseau de nœuds mobiles et terminal associé (Algorithme de dissémination basé sur un mécanisme d'émulation d'une infrastructure)", 16/11/2007, INPI FR # 07 59115.
- [P2] M. Jerbi, SM. Senouci, Y. Gourhant, Y. Ghamri-Doudane, "Procédé de diffusion de paquets de données dans un réseau de nœuds mobiles et terminal associé.", 26/10/2007, INPI FR # 07 06771.
- [P3] M. Jerbi, T. Rasheed, SM. Senouci, "Procédé d'estimation et de signalisation de la densité de nœuds mobiles dans un réseau routier", 09/02/2007, INPI FR # 07 53164.
- [P4] M. Jerbi, R. Meraihi, SM. Senouci, "Procédé de routage de paquets de données dans un réseau de nœuds mobiles et terminal associé", 24/05/2006, INPI FR # 06 04737.

B. REVUES INTERNATIONALES

- [J1] M. Jerbi, SM. Senouci, Y. Ghamri-Doudane, "Towards Efficient Routing in Vehicular Ad Hoc Networks" *for publication in the Ubiquitous Computing and Communication Journal (UBICC), special issue on UBIROADS.*
- [J2] M. Jerbi, SM. Senouci, T. Rasheed, Y. Ghamri-Doudane, "Towards Efficient Geographic Routing in Urban Vehicular Networks" *Submitted to IEEE TVT (IEEE Transaction on Vehicular Technology) (Under Review).*

C. CHAPITRES DE LIVRE

- [C1] R. Meraihi, SM. Senouci, D. Meddour et M. Jerbi, chapitre: "Communications véhicule à véhicule: applications et perspectives", Book Title: "Réseaux mobiles ad hoc et réseaux de capteurs sans fil", *Editeur: Hermes Science Publications (Février 2006).*
- [C2] M. Jerbi, SM. Senouci, M. Cherif, Y. Ghamri-Doudane "Vehicular Communications Networks: Current Trends and Challenges", Book Title: Encyclopedia of Next Generation Mobile Networks and Ubiquitous Computing. (Under Review).
- [C3] H. Moustafa, SM. Senouci, M. Jerbi "Introduction to Vehicular Networks", Book Title: Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications, *Publisher: Auerbach Publications – CRC Press (Taylor & Francis Group).*

D. CONFERENCES INTERNATIONALES AVEC ACTES

- [D1] M. Jerbi, A.L. Beylot, SM. Senouci, Y. Ghamri-Doudane "Geo-localized Virtual Infrastructure for VANETs: Design and Analysis", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM' 2008)*, New Orleans, LA, USA.
- [D2] M. Jerbi, SM. Senouci, Y. Ghamri-Doudane, A.L. Beylot, "Geo-localized Virtual Infrastructure for Urban Vehicular Networks", in *Proceedings of IEEE Intelligent Transport System Communication (ITST'2008)*, Phuket, Thailand, 22-24 October 2008.
- [D3] M. Jerbi, SM. Senouci, "Characterizing Multi-Hop Communication in Vehicular Networks", in *Proceedings of IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC'2008)*, Las Vegas, Nevada, USA, 31 March- 3 April 2008.
- [D4] M. Jerbi, SM. Senouci, T. Rasheed, Y. Ghamri-Doudane, "An Infrastructure-Free Traffic Information System for Vehicular Networks", *IEEE International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC'2007)*, Baltimore, USA, 30 September - 1 October 2007.
- [D5] T. Rasheed, U. Javaid, M. Jerbi and K. Al Agha, "Scalable Multi-hop Ad Hoc Routing Using Modified OLSR Routing Protocol," in *Proc. of 18th Annual IEEE International Symposium on Personal Indoor Mobile Radio Communications Conference (PIMRC'2007)*, Athens, September 2007.
- [D6] M. Jerbi, M. Al Haj, and SM. Senouci, "Extensive Experimental Characterization of Communications in Vehicular Ad Hoc Networks within Different Environments", in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'2007 Spring)*, Dublin, Ireland, 23-25 April 2007.
- [D7] M. Jerbi, SM. Senouci, R. Meraihi and Y. Ghamri-Doudane, "An Improved Vehicular Ad Hoc Routing Protocol for City Environments", in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'2007)*, Glasgow, Scotland, UK, 24-28 June 2007.

E. COLLOQUES INTERNATIONALS AVEC ACTES

- [E1] P. Marlier, M. Jerbi, SM. Senouci, "Experimental Assessment of V2V and I2V Communications", *International workshop on Mobile Vehicular Networks (MoVeNet'2007) co-located with IEEE MASS 2007*, Pisa, Italy, 8-12 October 2007.
- [E2] M. Jerbi, SM. Senouci, Y. Ghamri-Doudane, "Towards Efficient Routing in Vehicular Ad Hoc Networks", *International Workshop for ITS in Ubiquitous Roads (Ubiroads'07) co-located with IEEE GIIS 2007*, Marrakech, 6 July 2007.
- [E3] P. Marlier, M. Jerbi, SM. Senouci, "Experimental characterization of V2V and V2I communications", *International Workshop for ITS in Ubiquitous Roads (Ubiroads'07) co-located with IEEE GIIS 2007*, Marrakech, 6 July 2007.

F. POSTERS

- [F1] M. Jerbi, R. Meraihi, SM. Senouci, Y. Ghamri-Doudane, "GyTAR: improved Greedy Traffic Aware Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks in City Environments", *ACM International Workshop On Vehicular Ad Hoc Networks VANET'2006*, Los Angeles, USA, 29 September 2006.

G. CONFERENCES NATIONALES AVEC ACTES

- [G1] S. Khalfallah, M. Jerbi, M. Cherif, SM. Senouci, B. Ducourthial, "Expérimentations des communications inter-véhicules", *Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles CFIP'2008*, Les Arcs, France, 25-28 March 2008.

H. ARTICLES DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE

- [H1] M. Jerbi, SM. Senouci, and Y. Ghamri-Doudane, "GYTAR: Protocole de routage géographique pour les réseaux de véhicules", *Technique de l'Ingénieur N°5*, pp.4, Janvier-Février 2007.

I. JOURNEES NATIONALES SANS ACTES

- [I1] M. Jerbi, SM. Senouci, Y. Ghamri-Doudane, "Routage géographique pour réseaux véhiculaires dans un environnement urbain", *Journées Pôle ResCom - GDR ASR – CNRS*, Toulouse, 20-21 Septembre 2007.
- [I2] M. Jerbi, SM. Senouci, Y. Ghamri-Doudane, "An Infrastructure-Free Traffic Information System for Vehicular Networks", *Journées Pôle ResCom - GDR ASR – CNRS*, Marne-la-Vallée, 7-8 February 2008.
- [I3] M. Jerbi, SM. Senouci, AL. Beylot, Y. Ghamri-Doudane, "GVI : Mécanisme d'emulation d'une infrastructure", *Journées Pôle ResCom - GDR ASR – CNRS*, Evry, 20 Octobre 2008.

Protocoles pour les communications dans les réseaux de véhicules en environnement urbain : Routage et Geocast basés sur les intersections

Résumé :

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux communications inter-véhicules dans un environnement urbain. Notre objectif est de proposer des solutions de routage ad hoc et de dissémination géolocalisée adaptées à un environnement ville, répondant aux contraintes des communications inter-véhiculaires ad hoc.

Notre démarche consiste à prendre en compte un paramètre clé qui influence le bon fonctionnement du réseau ad hoc de véhicules, à savoir la densité du réseau. Dans un premier temps, nous proposons un mécanisme distribué qui permet de caractériser de manière fine la densité de trafic d'un tronçon de route entre deux intersections. Ensuite, nous proposons un nouveau protocole de routage géographique, qui tire partie des caractéristiques des voies urbaines et qui intègre le mécanisme d'estimation de densité de trafic pour le routage des paquets. Pour finir, nous proposons un nouveau mécanisme distribué et ad hoc qui permet d'émuler le fonctionnement d'une infrastructure classique destinée à diffuser localement (au niveau d'une intersection) des paquets de données de manière périodique. Certains aspects de nos solutions sont évalués analytiquement alors que leurs performances sont évaluées par simulation à l'aide de l'outil QNAP, du simulateur QualNet et du modèle de mobilité réaliste VanetMobiSim.

Mots-clés: Réseaux véhiculaires ad hoc, Environnement urbain, Routage Multi-sauts, Dissémination, Densité du trafic routier, Evaluation de performances.

Intersection-based Routing and Geocast in Urban Vehicular Networks

Abstract :

In this thesis, we focus on inter-vehicle communication in urban environments. Our main goal is to propose new routing and dissemination algorithms, which efficiently adapts to the vehicular networks characteristics and applications.

Temporary disconnection in vehicular network is unavoidable. It is thereby of imminent practical interest to consider the vehicular traffic density. Therefore, at first, we propose a completely distributed and infrastructure-free mechanism for city road density estimation. Then and based on such traffic information system, we propose a novel intersection-based geographical routing protocol, capable to find robust and optimal routes within urban environments. Finally, in order to help the efficient support of dissemination-based applications, a self-organizing mechanism to emulate a geo-localized virtual infrastructure is proposed, which can be deployed in intersections with an acceptable level of vehicular density. The advocated techniques are evaluated by a combination of network simulation and a microscopic vehicular traffic model.

Keywords: Vehicular Networks, IEEE 802.11, Urban environments, Multi-hop routing, Vehicular traffic density, Geolocalized dissemination, Performance evaluation.