

N° d'ordre 3101

# THESE

En vue de l'obtention du: **DOCTORAT**

Structure de Recherche : Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications  
Discipline : Sciences de l'ingénieur  
Spécialité : Informatique et Télécommunications

Présentée et soutenue le 12 Mai 2018 par :

**Imane ZAIMI**

**Vers une approche de routage multi-critères habile en QoS et efficace en QoE pour les réseaux véhiculaires**

## JURY

Moulay Driss RAHMANI	PES, Université Mohammed V, FS de Rabat	Président
Salma MOULINE	PES, Université Mohammed V, FS de Rabat	Examinatrice
Mohammed OUMSIS	PES, Université Mohammed V, EST de Salé	Directeur de thèse
Khalid MINAOUI	PH, Université Mohammed V, FS de Rabat	Rapporteur
Mohammed OUZZIF	PES, Université Hassan II, EST de Casablanca	Rapporteur
Azeddine ZAHI	PH, Université Sidi Mohamed ben Abdellah, FST de Fès	Rapporteur
Rachid BENABBOU	PH, Université Sidi Mohamed ben Abdellah, FST de Fès	Examineur
Abdelali BOUSHABA	PA, Université Sidi Mohamed ben Abdellah, EST de Fès	Invité

Année Universitaire : 2017/2018

باسم الله الرحمان الرحيم

و ما توفيقى إلا بالله عليه  
توكلت و إليه أنيب

"سورة هود"



---

## DÉDICACE

Je dédie ce travail

À mes très chers parents,

À vous qui m'avez éduqué et soutenu dans les moments les plus durs. Aujourd'hui, j'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondé en moi.

À la mémoire de mes grands-parents, paternels et maternels,  
Puisse dieu tout puissant, assurer le repos de vos âmes par sa sainte miséricorde.

À vous, Manal, Mounir, Younes et Zakaria,  
Je vous aime trop et vous espère le meilleur dans cette vie.

À toute ma famille EL BERHILI et ZAIMI; Mes tantes, mes oncles, mes cousines et mes cousins.

À vous mes meilleurs amis.

À tout mes collègues du laboratoire LRIT.

À toutes les personnes, qui, de près ou de loin, m'ont accompagné, m'ont soutenu et m'ont apporté une aide précieuse durant ce laborieux parcours. Puisse ce travail être le témoignage de mes sentiments sincères.

***ZAIMI Imane***





---

## AVANT-PROPOS

Ce travail de thèse doctorale, qui s'inscrit dans la durée, a été réalisé au sein du laboratoire de recherche en informatique et télécommunications (LRIT), à la faculté des sciences de Rabat (FSR) de l'université Mohammed V, sous la direction et la supervision de M. Mohammed OUMSIS. À l'issue de la rédaction de cette thèse, je suis convaincue que la recherche est loin d'être un travail solitaire. En préambule, j'adresse mes hommages et remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je tiens à rendre hommage à feu M. Driss ABOUTAJDINE, ancien professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat et ancien responsable de la structure de recherche LRIT. Je lui suis reconnaissante pour la confiance qu'il m'avait accordé en m'offrant l'opportunité d'intégrer l'univers de la recherche scientifique ainsi que pour les efforts indéniables afin de procurer aux doctorants du laboratoire les meilleures conditions pour la réalisation de leurs projets de thèse.

Je remercie infiniment M. Mohamed OUADOU, professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat et responsable du laboratoire LRIT, pour sa disponibilité, sa gentillesse et ses rigoureux conseils.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à mon directeur de thèse et encadrant, M. Mohammed OUMSIS, qui a supervisé ce travail de thèse en m'aidant à bien assimiler le sujet.

Je remercie également M. Moulay Driss RAHMANI, professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie sincèrement Mme. Salma MOULINE, professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat, qui a bien voulu prendre part à ce jury en tant qu'examinatrice.

Ma gratitude est destinée également à M. Rachid BENABBOU, professeur habilité à la faculté des sciences et techniques de Fès, qui a accepté d'examiner ce mémoire. Je le remercie pour tout l'intérêt qu'il a manifesté.

Je remercie aussi M. Khalid MINAOUI, professeur habilité à la faculté des sciences de Rabat, pour le temps consacré à rapporter ce travail.

Je suis reconnaissante envers M. Azeddine ZAHI, professeur habilité à la faculté des sciences et techniques de Fès, qui a accepté de rapporter mon mémoire. Je le remercie pour toutes ses remarques aussi intéressantes les unes que les autres.

Sans oublier M. Mohammed OUZZIF, professeur de l'enseignement supérieur à l'école supérieure de technologie de Casablanca, que je remercie d'avoir également accepté de rapporter mon travail de thèse et pour toutes ses remarques enrichissantes.

Enfin, ma gratitude va à M. Abdelali BOUSHABA, professeur assistant à la faculté des sciences et technique de Fès, qui a bien voulu se joindre au jury et m'honorer en tant que professeur invité.





---

## RÉSUMÉ

L'utilisation des applications multimédia en général, et du service *streaming* en particulier, entraîne une croissance au niveau des attentes et des exigences des utilisateurs en termes d'efficacité. Autrement dit, la définition des besoins en termes de la qualité de service (QoS) et de la qualité de l'expérience (QoE) est vivement sollicitée. Par conséquent, en raison de l'instabilité que connaît ce type de réseau, nous sommes convaincus que le recours à un protocole de routage fondé sur la QoS est une bonne alternative pour assurer une connectivité robuste entre les noeuds participants à la transmission. Ce travail de thèse s'inscrit sous forme d'une contribution à la recherche dans le domaine de l'optimisation du flux vidéo dans les réseaux VANET. Ainsi, nous avons proposé deux nouvelles approches : l'approche floue et l'approche multi-prochains-sauts.

Tout d'abord, une étude qualitative et quantitative a été réalisée dans le but d'évaluer dix protocoles de routage les plus représentatifs. Suite à laquelle, le protocole géographique GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) a été élu pour des éventuelles contributions suivies dans ce travail de thèse.

Notre première recommandation, appelée FzGR (*Fuzzy Geographical Routing*), est implémentée en deux parties. Chacune utilise une combinaison différente d'algorithmes de logique floue. FzGR a prouvé sa capacité à sélectionner, d'une manière intelligente, un meilleur prochain saut à partir de la mesure multi-contraintes calculée en temps réel.

Et afin d'exploiter au préalable la topologie du réseau, nous avons discuté un second nouvel algorithme de routage, appelé MNH-FGR (*Multi Next Hop Fuzzy Geographical Routing*). Celui-ci n'est que le résultat de l'implémentation de l'approche multi-sauts au protocole FzGR avec un processus d'équilibrage de charge. Le protocole MNH-FGR donne des résultats considérables et surpasse la performance de GPSR classique, de FzGR proposé, ainsi que celles d'autres variantes récentes tirées de la littérature.

**Mots clés :** VANET ; Environnement urbain ; Routage multimédia ; Logique floue ; QoS ; QoE.





---

## ABSTRACT

The use of multimedia applications in general and the streaming service in particular, leads to a growth in expectations and user requirements in terms of efficiency. In other words, quality of service (QoS) and quality of experience (QoE) requirements are strongly sought for VANET. Therefore, due to the instability experienced by this type of network, we are convinced that the use of a QoS-based protocol during the routing decision is a good alternative to ensure robust connectivity between participating nodes. This thesis is part of a contribution to research in the field of video stream optimization in VANET. In this context, we have proposed two new approaches : the fuzzy logic approach and the multi-next-hop approach.

In the first place, a qualitative and quantitative study was carried out in order to evaluate ten most representative routing protocols. Accordingly, the GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing Protocol) was elected for possible contributions that are followed in this thesis.

Our first recommendation, called FzGR (Fuzzy Geographical Routing), is implemented into two parts. Each of these parts uses a different combination of fuzzy logic algorithms. FzGR has proven its ability to intelligently select a better next-hop from the real-time multi-constraints QoS measurement.

Finally, and in order to exploit the topology of the network whenever it is possible, we have discussed the second proposal, called MNH-FGR (Multi Next Hop Fuzzy Geographical Routing Protocol). It represents the result of the implementation of the multi-next-hop approach in the FzGR protocol. A load balancing process has also been considered with respect to the various selected links between the sender node and all its next-hops. MNH-FGR gives considerable results and surpasses the performance of the conventional GPSR, the proposed FzGR, as well as those of other variants extracted from the literature.

**Key words :** *VANET; Urban area; Multimedia routing; Fuzzy logic; QoS; QoE.*





---

## TABLE DES MATIÈRES

Liste des acronymes	15
Liste des figures	19
Liste des tableaux	1
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
Contexte scientifique général . . . . .	1
Projets réalisés en vertu des réseaux VANET . . . . .	2
Motivations . . . . .	3
Problématique . . . . .	4
Objectifs et intérêts de la thèse . . . . .	5
Méthodologie et contributions de la thèse . . . . .	5
Structuration du mémoire . . . . .	7
<b>Chapitre 1 : Réseaux véhiculaires ad-hoc - Généralités et état de l'art . .</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction . . . . .	9
1.2 Réseaux véhiculaires ad-hoc : architecture, communications et propriétés .	10
1.2.1 Architecture d'un réseau VANET . . . . .	10
1.2.1.1 Unité de bord OBU ( <i>On Board Unit</i> ) . . . . .	10
1.2.1.2 Unité d'application UA ( <i>Application Unit</i> ) . . . . .	11
1.2.1.3 Unité du côté de la route RSU ( <i>Road Side Unit</i> ) . . . . .	11
1.2.2 Communications dans un réseau VANET . . . . .	12
1.2.2.1 Communication V2V . . . . .	12
1.2.2.2 Communication V2I/I2V . . . . .	12
1.2.2.3 Communication hybride . . . . .	13
1.2.3 Noeud du réseau VANET . . . . .	13
1.2.4 Technologies de communication sans fil pour un réseau VANET . .	14
1.2.4.1 Couvertures radio existantes . . . . .	14
1.2.4.2 Standard IEEE 802.11- Technologie DSRC- Norme 802.11p	15
1.2.5 Caractéristiques et contraintes du réseau VANET . . . . .	16
1.2.5.1 Caractéristiques . . . . .	16
1.2.5.2 Contraintes . . . . .	17

1.3	Réseaux véhiculaires ad-hoc : applications multimédia . . . . .	18
1.3.1	Naissance du service <i>streaming</i> . . . . .	19
1.3.2	Méthodes de diffusion de la vidéo . . . . .	19
1.3.2.1	Codage vidéo évolutif . . . . .	20
1.3.2.2	Compression vidéo et types d'encodage . . . . .	21
1.3.2.3	Structure d'une <i>frame</i> . . . . .	23
1.4	Conclusion . . . . .	23
<b>Chapitre 2 : Protocoles de routage - État de l'art et étude par simulation</b>		<b>25</b>
2.1	Introduction . . . . .	25
2.2	Protocoles de routage : classification et description . . . . .	26
2.2.1	Protocoles basés sur la topologie . . . . .	27
2.2.1.1	Protocoles de routage réactifs (à la demande) . . . . .	27
2.2.1.2	Protocoles de routage pro-actifs . . . . .	30
2.2.1.3	Protocoles de routage hybrides . . . . .	33
2.2.2	Protocoles basés sur la position . . . . .	34
2.2.2.1	Protocoles de routage non tolérants au retard (N-DTN) . . . . .	35
2.2.2.2	Protocoles de routage tolérants au retard DTN . . . . .	35
2.2.2.3	Protocoles de routage hybrides . . . . .	36
2.3	Travaux comparatifs antérieurs . . . . .	37
2.4	Environnement de simulation . . . . .	39
2.4.1	Critères d'évaluation des performances . . . . .	39
2.4.1.1	Qualité de service (QoS) . . . . .	39
2.4.1.2	Qualité de l'expérience (QoE) . . . . .	41
2.4.2	Vue d'ensemble sur les simulateurs exploités . . . . .	42
2.4.2.1	Simulateur de réseau NS-2 . . . . .	42
2.4.2.2	Simulateur de mobilité VanetMobiSim . . . . .	46
2.4.2.3	Générateur de trafic vidéo Evalvid . . . . .	47
2.4.3	Paramètres de simulation . . . . .	48
2.5	Étude comparative par rapport au flux vidéo . . . . .	49
2.5.1	Analyse des résultats de QoS . . . . .	49
2.5.1.1	Mesure du PDR . . . . .	49
2.5.1.2	Mesure du délai de bout en bout . . . . .	52
2.5.1.3	Mesure du débit . . . . .	54
2.5.1.4	Mesure de la surcharge . . . . .	55
2.5.2	Analyse des résultats de QoE . . . . .	56
2.5.3	Discussion générale des résultats de QoS et de QoE . . . . .	58
2.6	Résultats de simulation face aux tendances de la qualité de vidéo . . . . .	59
2.7	Conclusion . . . . .	60
<b>Chapitre 3 : GPSR - Étude de l'existant</b>		<b>63</b>
3.1	Introduction . . . . .	63

3.2	Préliminaires . . . . .	64
3.3	Mécanismes de routage du protocole GPSR . . . . .	64
3.3.1	Routage basé sur la méthode gourmande « <i>greedy</i> » . . . . .	65
3.3.1.1	Principe <i>greedy</i> . . . . .	65
3.3.1.2	Principe de balisage . . . . .	66
3.3.1.3	Avantage du processus <i>greedy</i> . . . . .	67
3.3.1.4	Limitations du processus <i>greedy</i> . . . . .	67
3.3.1.5	Rôle de la densité du réseau . . . . .	68
3.3.2	Routage basé sur le périmètre . . . . .	68
3.3.2.1	Graphe planaire . . . . .	69
3.4	Travaux antérieurs basés sur le protocole GPSR . . . . .	71
3.5	Conclusion . . . . .	73

## Chapitre 4 : Amélioration du protocole GPSR par une approche floue

	<b>multi-critères . . . . .</b>	<b>75</b>
4.1	Introduction . . . . .	75
4.2	Travaux antérieurs en vertu de la logique floue . . . . .	76
4.3	Système flou proposé pour GPSR . . . . .	78
4.3.1	Approche floue pour l'amélioration de GPSR . . . . .	78
4.3.1.1	Calcul des paramètres d'entrée pour le premier bloc CLF . . . . .	81
4.3.1.2	Théories du contrôle flou et des ensembles flous . . . . .	82
4.3.1.3	Nombres flous : Gaussian, S-shaped et Z-shaped . . . . .	82
4.3.1.4	CLF pour calculer le coût du lien « <i>Coût_Lien</i> » . . . . .	84
4.3.1.5	CLF pour calculer le poids du lien « <i>Poids_Lien</i> » . . . . .	88
4.3.1.6	Choix des intervalles flous . . . . .	90
4.3.2	Défis surmontés par rapport à la stabilité du réseau . . . . .	92
4.3.2.1	Continuité du flux vidéo . . . . .	92
4.3.2.2	Boucle de routage . . . . .	92
4.3.2.3	Processus basé sur le périmètre . . . . .	93
4.4	Évaluation des performances . . . . .	93
4.4.1	Paramètres de simulation . . . . .	93
4.4.2	Simulations et discussion par rapport à un milieu urbain sans obstacles . . . . .	94
4.4.2.1	Mesures de la QoS en fonction de la densité du réseau . . . . .	94
4.4.2.2	Mesures de la QoE en fonction de la densité du réseau . . . . .	97
4.4.3	Simulations et discussion par rapport à un milieu urbain avec obstacles . . . . .	100
4.4.3.1	Modèle de propagation radio <i>Nakagami</i> . . . . .	100
4.4.3.2	Mesures de la QoS en fonction de la densité du réseau . . . . .	101
4.5	Protocole FzGR vs variantes de GPSR tirées de la littérature . . . . .	102
4.6	Conclusion . . . . .	103

## Chapitre 5 : Technique de sélection multi-prochains-sauts associée à l'approche floue . . . . . 105

5.1	Introduction . . . . .	105
5.2	Travaux antérieurs en vertu de l'approche multi-chemins . . . . .	106
5.3	Système multi-prochains-sauts proposé pour FzGR . . . . .	107
5.3.1	Amélioration du protocole FzGR . . . . .	107
5.3.1.1	Approche multi-prochains-sauts . . . . .	107
5.3.1.2	Équilibrage de charge . . . . .	110
5.3.2	Type de sélection multi-prochains sauts . . . . .	113
5.3.2.1	Noeuds disjoints . . . . .	114
5.3.2.2	Chemins disjoints . . . . .	114
5.3.2.3	Noeuds/Chemins non-disjoints . . . . .	114
5.4	Évaluation des performances . . . . .	114
5.4.1	Paramètres de simulation . . . . .	114
5.4.2	Simulations et discussion des résultats . . . . .	115
5.4.2.1	Mesures de la QoS en fonction de la densité du réseau . . . . .	115
5.4.2.2	Mesures de la QoE en fonction de la densité du réseau . . . . .	117
5.5	Conclusion . . . . .	118
	<b>Conclusion générale</b>	<b>121</b>
	<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>125</b>
	<b>Liste des publications et communications</b>	<b>141</b>



---

## LISTE DES ACRONYMES

### A

AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector
ASTM	American Society for Testing and Materials

### C

CIF	Common Intermediate Format
CIV	Communication Inter-Véhicules
CLF	Contrôleur de Logique Floue
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CVIS	Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems

### D

DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
DSRC	Dedicated Short Range Communications
DTN	Delay Tolerent Network
DYMO	Dynamic MANET on Demand

### E

ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EDR	Event Data Recorder

### F

FCC	Federal Communication Commission
FzGR	Fuzzy Geographical Routing
FSR	Fisheye State Routing

### G

GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GSM	Global System for Mobile communications
GST	Global System for Telematics
GyTAR	Improved Greedy Traffic Aware Routing protocol

### H

HLAR	Hybrid Location-based Ad-hoc Routing
------	--------------------------------------

### I

IDM	Intelligent Driving Model
-----	---------------------------

IDM-IM	Intelligent Driving Model with Intersection Management
IDM-LC	Intelligent Driving Model with Lane Changing
ITS	Intelligent Transportations Systems
ITU	Union Internationale des Télécommunications
<b>J</b>	
JPEG	Joint Photographic Experts Group
<b>M</b>	
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MNH-FGR	Multi Next Hop Fuzzy Geographical Routing
MPEG	Moving Picture Experts Group
<b>N</b>	
NOW	Network on Wheels
NS-2	Network Simulator 2
NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
<b>O</b>	
OBU	On Board Unit
OLSR	Optimized Link State Routing
<b>P</b>	
PDR	Packet Delivery Ratio
<b>Q</b>	
QoS	Quality of Services
QoE	Quality of Experience
<b>R</b>	
RSU	Road Side Units
<b>S</b>	
STI	Systèmes Intelligents de Transport
SVC	Scalable Video Coding
<b>U</b>	
UA	Application Unit
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
<b>V</b>	
V2V	Vehicle to Vehicle
V2I	Vehicle to Infrastructure
VADD	Vehicle Assisted Data Delivery
VANET	Vehicular Ad-hoc NETWORK
<b>W</b>	
WAVE	Wireless Ability in Vehicular Environments
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
<b>Z</b>	
ZRP	Zone Routing Protocol



---

## LISTE DES FIGURES

1	Caméra CMOS pour les véhicules . . . . .	2
2	Démarche méthodologique du travail de thèse . . . . .	7
1.1	Architecture du réseau VANET . . . . .	11
1.2	Types de communication dans VANET . . . . .	12
1.3	Composants physiques d'un véhicule intelligent . . . . .	13
1.4	H.264/SVC : différents types d'évolution . . . . .	20
1.5	Réduction de la redondance spaciale et temporelle . . . . .	21
2.1	Taxonomie des protocoles de routage . . . . .	27
2.2	Protocoles réactifs - Demandes échangées . . . . .	28
2.3	Protocoles pro-actifs - Mécanismes de fonctionnement : a) DSDV, b) FSR et c) OLSR . . . . .	32
2.4	Protocoles hybrides - Concept du protocole ZRP . . . . .	33
2.5	Protocoles géographiques - Mécanismes de fonctionnement : (a) GPSR, (b) VADD et (c) HLAR . . . . .	34
2.6	Couches NS-2 et dualité OTCL/C++ . . . . .	43
2.7	Interaction de NS-2 avec d'autres outils . . . . .	43
2.8	Topologie aléatoire utilisée pour nos simulations . . . . .	47
2.9	Evalvid et NS-2 : bloc de méthodologie . . . . .	48
2.10	PDR; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité . . . . .	50
2.11	Délai; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité . . . . .	52
2.12	Débit; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité . . . . .	54
2.13	Surcharge; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité . . . . .	56
2.14	Mesures de QoE en fonction de la charge du réseau : (a)PSNR, (b)VQM et (c)SSIM . . . . .	57
2.15	Métrique MOS selon : (a) PSNR, (b) VQM et (c) SSIM . . . . .	58
3.1	Démarches d'expédition avec GPSR . . . . .	65
3.2	Illustration des algorithmes d'acheminement des paquets de données . . . . .	66
3.3	Routage <i>greedy</i> en cas de : a) un meilleur prochain saut et b) n meilleurs prochains sauts . . . . .	68
3.4	Illustration des graphes planaires . . . . .	69
3.5	Règle de la main droite . . . . .	70

3.6	Exemples de scénarios avec le protocole GPSR . . . . .	70
4.1	Modèle général du système proposé . . . . .	79
4.2	Sélection du meilleur prochain saut basée sur le poids du lien . . . . .	79
4.3	Nombres flous : Z-shaped, Gaussian et S-shaped . . . . .	83
4.4	Fonctions d'appartenance pour le premier bloc CLF . . . . .	84
4.5	Vue de surface de la mesure de sortie Coût_Lien . . . . .	85
4.6	Base des règles floues . . . . .	86
4.7	Fonctions d'appartenance pour le deuxième bloc CLF . . . . .	88
4.8	Illustration des règles SI-ALORS depuis MATLAB . . . . .	90
4.9	Boucle de routage évitée par FzGR . . . . .	93
4.10	Mesures de QoS pour la vidéo d' <i>Akiyo</i> . . . . .	96
4.11	Mesures de QoS pour la vidéo d' <i>Foreman</i> . . . . .	96
4.12	Mesures de QoS pour la vidéo d' <i>Highway</i> . . . . .	97
4.13	Mesures de QoE pour la vidéo d' <i>Akiyo</i> . . . . .	98
4.14	Mesures de QoE pour la vidéo de <i>Foreman</i> . . . . .	98
4.15	Mesures de QoE pour la vidéo du <i>Highway</i> . . . . .	98
4.16	Captures vidéo de : <i>Akiyo</i> , <i>Foreman</i> et <i>Highway</i> avec (a) GPSR et (b) FzGR	99
4.17	Exemple de scénario avec obstacles. . . . .	100
4.18	Modèle urbain basé sur <i>Nakagami</i> adopté lors de nos simulations . . . . .	101
4.19	Mesures de QoS - <i>Two Ray Ground</i> vs <i>Nakagami</i> . . . . .	102
5.1	Illustration des termes suivants : saut, liaison et chemin . . . . .	106
5.2	Méthodologie constructive de l'approche GPSR-2P . . . . .	108
5.3	Méthodologie constructive de l'approche GPSR-kP . . . . .	109
5.4	Illustration de la politique pondérée pour MNH-FGR . . . . .	109
5.5	N liaisons pondérées entre chaque noeud expéditeur et ses voisins directs depuis la source S jusqu'à la destination D . . . . .	111
5.6	Illustration des trois types de sélection multi-prochains sauts en fonction des poids des liaisons : (a) graphe initial, (b) noeuds disjoints, (c) liens disjoints et (d) noeuds/liens non disjoints. . . . .	113
5.7	District de colombie, Whashington . . . . .	115
5.8	Mesures de QoS en fonction de la densité : (a) PDR, (b) Délai, (c) Débit et (d) Surcharge . . . . .	115
5.9	Mesures de QoE en fonction de la densité : (a) PSNR, (b) SSIM et (c) VQM118	



---

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Formats dérivés de CIF . . . . .	21
1.2	Types de compression MPEG . . . . .	22
1.3	Exemples d'encodage vidéo . . . . .	22
2.1	Paquets de contrôle utilisés par AODV pour la découverte des routes . . . . .	28
2.2	Protocoles AODV, DSR et DYMOUM - Avantages et inconvénients . . . . .	30
2.3	Protocoles DSDV, FSR et OLSR - Avantages et inconvénients . . . . .	33
2.4	Protocole ZRP - Avantages et inconvénients . . . . .	34
2.5	Protocoles VADD, GPSR and HLAR - Avantages et inconvénients . . . . .	37
2.6	Décisions pour tracer le MOS . . . . .	42
2.7	Valeurs prises en compte dans la simulation . . . . .	48
2.8	Comparaison entre GPSR et DSR selon la charge de trafic . . . . .	59
2.9	Comparaison entre les dix protocoles de routage étudiés . . . . .	61
3.1	Algorithmes d'acheminement des paquets de données . . . . .	66
3.2	Contenu de la liste des voisins d'un noeud N . . . . .	67
3.3	Les travaux de recherche basés sur l'implémentation de GPSR . . . . .	71
4.1	Algorithme de déclaration de la mesure Poids_Lien . . . . .	80
4.2	Éléments constitutionnels du CLF [1] . . . . .	83
4.3	Ensembles flous pour les paramètres d'entrée : délai, débit et tailleBfr . . . . .	84
4.4	Ensembles flous pour le paramètre de sortie Coût_Lien . . . . .	85
4.5	Règles SI-ALORS pour le calcul de la mesure Coût_Lien . . . . .	87
4.6	Ensembles flous pour le paramètre d'entrée : distance . . . . .	89
4.7	Ensembles flous pour le paramètre de sortie : Poids_Lien . . . . .	89
4.8	Règles SI-ALORS pour le calcul de la mesure Poids_Lien . . . . .	90
4.9	Étude paramétrique : variation des plages . . . . .	91
4.10	Paramètres de simulation . . . . .	94
4.11	Taux d'amélioration de la QoS . . . . .	97
4.12	Taux d'amélioration de la QoE . . . . .	100
4.13	FzGR vs récentes variantes de GPSR . . . . .	103
5.1	Algorithme multi-prochains-sauts de MNH-FGR . . . . .	112

5.2	Taux d'amélioration : MNH-FGR vs GPSR-kP pour toutes les variations de densité . . . . .	117
5.3	Taux d'amélioration : MNH-FGR vs FzGR, GPSR-2P et GPSR-kP . . . .	117



---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### Contexte scientifique général

Au cours de ces dernières décennies, la communication mobile a transformé positivement notre mode de vie au moyen de l'échange souple de l'information sur un réseau sans fil indépendamment des caractéristiques spatio-temporelles [2]. Cette tendance a vigoureusement pris le dessus dans les systèmes de transport, où le partage de données est devenu beaucoup plus facile grâce à l'incorporation de diverses applications liées au domaine des systèmes de transport intelligents (STI). Dans ce cadre, nous citons les applications de sécurité [3], les applications de gestion du trafic [4] et celles destinées au confort des usagers de la route [5]. Ainsi, les utilisateurs, qu'ils soient conducteurs ou passagers, profiteront pleinement d'une zone routière couverte et plus agréable (i.e. accès à Internet et aux médias sociaux, consignes de circulation et de déplacement entre véhicules, etc [6]).

Un réseau véhiculaire ad-hoc (VANET) est une projection des STI qui rassemble les différents exemples d'applications cités. Grâce à une architecture qui couvre des structures matérielles et logicielles particulières, l'usage répandu du réseau VANET contribuera à des villes intelligentes et des routes plus sûres offrant des informations opportunes aux concernés [7]. En effet, les dernières avancées industrielles, scientifiques et technologiques ont favorisé d'une manière éminente le développement du réseau VANET qu'il constitue aujourd'hui l'un des sujets de recherche phare. Son principe est simple : les véhicules doivent communiquer les uns avec les autres aussi bien qu'avec les équipements de la route. Les futurs réseaux de véhicules mêleront donc certainement des communications véhicule à véhicule (V2V) ou véhicule à infrastructure (V2I), ce qui engendrera un intérêt majeur par rapport à la connectivité. Or, ceci n'est pas simple de par la nature hautement dynamique des réseaux véhiculaires.

Récemment, la recherche a versé son attention à des questions de rapidité, de coût et de perception vis-à-vis des applications multimédia. Celles-ci ont su s'imposer dans les réseaux sans fil [8], en général, et dans les réseaux VANET, en particulier, grâce à la disponibilité des caméras CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) connues par leur grande rapidité de traitement et leur faible coût (voir figure 1). Ainsi, les réseaux véhiculaires vont devoir faire face à des circonstances sévères et des contraintes strictes de qualité vidéo. En contre partie, l'implication de la vidéo au coeur d'un tel réseau va permettre, sans contestation, de visualiser beaucoup plus clairement les faits et par conséquent de prendre des décisions convenables à leur égard.

Toutefois, avec des véhicules se comportant comme des routeurs sur un réseau décen-



FIGURE 1 – Caméra CMOS pour les véhicules

tralisé et sans infrastructure, un protocole de routage ad-hoc distribué s'avère nécessaire. À cette fin, la littérature propose plusieurs protocoles de routage qui sont classifiés suivant la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données. Cependant, pour déployer des applications exigeantes, il semble important d'adapter ces protocoles afin de supporter un niveau de QoS satisfaisant [9].

Face à cette réalité et dans le but de développer de nouvelles compétences dans ce domaine, le projet de recherche initiant les travaux de cette thèse, intitulé « Vers une approche de routage multi-critères habile en QoS et efficace en QoE pour les réseaux véhiculaires » a été proposé.

## Projets réalisés en vertu des réseaux VANET

L'année 1980 a été marquée par l'apparition des premiers travaux dédiés à la communication inter-véhicules (CIV) [10]. Ces travaux ont vu le jour au Japon suite au problème de déplacement des gens et de la marchandise. Ainsi, de nouvelles propositions comme la conduite automatique et la planification intelligente des routes ont été incitées.

Au fil des années, une phase exploratrice au moyen de divers projets a été menée par plusieurs institutions gouvernementales à travers le monde. En effet, un nombre remarquable d'unités de recherche ont été impliquées. En conséquence, des systèmes de gestion de la circulation ont été installés dans les grandes villes japonaises et sur la plupart des autoroutes urbaines et inter-urbaines [10].

Par ailleurs, en Europe, différents projets à grande échelle ont apparu. Pourtant, la plupart d'entre eux se révèlent très coûteux à cause de l'utilisation de l'infrastructure existante pour la mise en place du système CIV. Nous citons deux de ces projets : DRiVE (*Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments*) [11] et GST (*Global Systems for Telematics*) [12]. Le projet DRiVE s'intéresse à la convergence entre plusieurs technologies cellulaires et réseaux hauts débit, alors que le projet GST se concentre sur l'utilisation du réseau GSM (*Global System for Mobile communications*). Le rôle prééminent qui incombe au projet GST est d'assurer la sécurisation de l'infrastructure réseau et service, la sûreté de fonctionnement et le paiement.

Outre cela, l'union européenne a déclaré depuis peu de temps qu'à partir de l'année

2018, l'intégration du système d'appel d'urgence, appelé *eCall*, est jugée indispensable sur toutes les voitures demeurant novices. Ceci va permettre d'informer et d'avertir systématiquement les services de secours en cas d'accident sur la route [13]. D'un autre côté, les spécialistes du domaine estiment que dans un avenir très proche, la connectivité entre les véhicules va être la règle et non pas l'exception. En effet, ils s'attendent à ce que les véhicules connectés à Internet atteignent les 20% d'ici 2020 [14].

Nous présentons dans ce qui suit quelques consortiums et projets réalisés lors de ces dernières années et qui saluent notamment les progrès accomplis dans le domaine des communications véhiculaires :

- Le consortium de communication *Car2Car* : ce consortium a pour objectif de renforcer la sécurité routière et l'efficacité du trafic routier à travers l'utilisation des CIV [15]. Ses principales missions sont : (i) la création d'un standard européen basé sur des composants LAN (*Local Area Network*) sans fil pour les communications inter-véhicules (V2V), (ii) le développement des prototypes et des démonstrateurs des systèmes V2V pour les applications de sécurité routière, (iii) l'attribution d'une bande de fréquence exclusive libre pour les applications V2V en Europe, et enfin (iv) le développement des stratégies de déploiement et des modèles économiques pour la pénétration du marché.

- À part l'aspect sécuritaire, le soutien du service de divertissement a été pris en compte dans plusieurs projets de recherche récents afin d'accroître le confort et la commodité des usagers de la route. Par exemple, le projet européen CVIS (*Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*) qui s'intéresse au développement des systèmes coopératifs des infrastructures des véhicules [16]. Pour permettre les communications V2V et V2I, le projet CVIS devrait supporter une variété d'applications commerciales plus commodes. Du côté allemand, Fleetnet est un autre exemple de projet de divertissement [17]. Son rôle majeur est de développer une plate-forme pour les communications V2V afin de fournir à la fois des services de confort et des applications de sécurité. Toujours en Allemand, le projet NOW (*Network on Wheels*) a été également établi en vue de développer des protocoles de communication pour l'info-divertissement et le service d'assistance de sécurité [18].

## Motivations

Les recherches menées dans ce travail de thèse trouvent leur motivation dans les constats majeurs suivants :

- L'appui apporté à la mobilité prend toute son ampleur dans le cadre de l'amélioration de la circulation routière en proposant d'une part, le meilleur système de transport pour effectuer un déplacement, et d'autre part, un accompagnement du conducteur tout au long de son trajet.

- Au-delà des applications traditionnelles, notamment l'alerte aux accidents et les informations de trafic échangées, les communautés scientifiques et industrielles envisagent la communication vidéo au sein des véhicules. En fait, le principe de communication vidéo est crucial pour renforcer la gestion du trafic ainsi que pour fournir une valeur ajoutée au niveau des services de divertissement et d'avertissement. En effet, dans le cadre d'une urgence routière, diffuser une vidéo en direct depuis la zone où s'est produit l'accident,

permet aux véhicules officiels d'approcher de près la scène afin de mieux comprendre la nature de l'accident et par conséquent prendre la bonne décision.

- La distribution du contenu multimédia aux véhicules appartenant à une zone d'intérêt est un service prometteur. Citons le cas des hôtels locaux qui diffusent des vidéos publicitaires vers des véhicules entrant dans la ville, des sociétés de voyage qui diffusent des promotions de leurs activités dans les zones touristiques, ou encore des entreprises qui diffusent des films pour les passagers des sièges arrière tout au long d'une distance assez importante de l'autoroute.

- Le soutien des services multimédia par le biais des RSU (*Road Side Unit*) est encore une question ouverte en raison de deux préoccupations : la dégradation du débit causée par les interférences et le coût très élevé qui ne permet pas l'utilisation d'un nombre suffisants de RSU pour couvrir les routes. Par conséquent, la communication ad-hoc inter-véhicules est essentielle pour assurer une large diffusion de la vidéo dans le réseau.

- Dans le but d'assurer une bonne communication V2V, les protocoles de routage font l'objet de plusieurs études comparatives par rapport à deux grandes classes : topologique et géographique. D'après plusieurs travaux existants, par exemple [19, 20, 21, 22], les chercheurs utilisent des approches de simulation différentes et aboutissent à des conclusions divergentes. Ainsi, trancher cette question du choix de la meilleure classe et du protocole le plus approprié est difficile. Ceci nous impose de mener notre propre étude comparative avant d'entamer n'importe quelle contribution dans ce domaine.

## Problématique

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la transmission vidéo inter-véhicule pour assurer la sûreté et le divertissement aux usagers de la route. Un réseau VANET, qui ne représente qu'un cas particulier du réseau MANET (*Mobile Ad-hoc Network*) [23], se révèle être un support intéressant pour le déploiement des applications multimédia. Effectivement, un tel réseau ne nécessite ni câblages, ni infrastructures et permet de recevoir l'information d'une manière assez simple et souple. En conséquence, les véhicules contribuent à la performance globale du système de manière intermittente et imprévisible présentant un haut niveau de fluidité et de disponibilité [24]. Toutefois, les contraintes du réseau VANET liées aux particularités de l'environnement routier en termes de non stabilité (e.g. véhicules très actifs, changement de topologie rapide, imprévisible et intelligent), celles liées aux besoins du flux vidéo (e.g. traitement, qualité de service, transmission, codage), ainsi que celles liées à l'utilisateur lui-même (e.g. qualité d'expérience) doivent être prises en considération lors de toute conception d'un environnement VANET.

Ceci laisse toutefois admettre qu'assurer un routage optimal est une opération délicate qui consiste à déterminer un chemin fiable entre les noeuds connectés du réseau pour transférer les informations vers la bonne destination. Le problème qui se pose à cet égard est lié à la prise en charge par les terminaux eux-mêmes de l'acheminement des paquets de données en suivant un algorithme de routage distribué. Toutes ces contraintes imposent de fournir des solutions de routage lucides pour des transmissions multimédia.

## Objectifs et intérêts de la thèse

L'étape initiale de cette thèse est d'évaluer plusieurs stratégies de routage en tenant en considération les mesures requises pour satisfaire les exigences des applications multi-média. La vision majeure est de refléter des solutions tangibles pour donner l'opportunité aux chercheurs de considérer une stratégie adéquate par rapport à un usage particulier.

Par la suite, plusieurs approches peuvent être envisagées afin de répondre à notre problématique. Nous proposons deux solutions, une basée sur la logique floue, et l'autre basée sur la sélection multi-prochains-sauts. Ces deux solutions sont appliquées au protocole de routage géographique le plus prometteur : le protocole GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*). Nous souhaitons évaluer dans quelle mesure GPSR peut s'adapter aux caractéristiques et aux changements du réseau VANET en vue de garantir une communication continue, fiable et optimale. En effet, grâce à une adaptation multi-critères de QoS, nous sommes fermement convaincus de pouvoir supporter au mieux les contraintes de mobilité et du délai imposées sur l'ensemble du réseau.

## Méthodologie et contributions de la thèse

Pour accomplir l'objectif de notre étude de recherche, nous avons suivi une méthodologie qui se résume dans les étapes suivantes :

**1. Cadrage des concepts généraux des réseaux véhiculaires sans fil :** Dans cette première étape, nous avons présenté les caractéristiques d'un réseau VANET, ses avantages et ses limitations. Une étude des protocoles de routage existants a été aussi prise en compte. En effet, nous avons abordé en particulier dix stratégies de routage appartenant à de différentes classes. Après les avoir profondément étudié, ils ont été intégrés dans le simulateur de réseau NS-2.33.

**2. Choix du protocole de routage le plus approprié :** Grâce à la simulation, une comparaison qualitative de ces protocoles a été effectuée. Suite à laquelle, le protocole géographique GPSR a été élu pour des éventuelles améliorations. En effet, notre étude comparative, appuyée par les travaux existants, agréé que les protocoles basés sur la position sont les plus éligibles vis-à-vis des réseaux véhiculaires fortement dynamiques.

**3. Étude approfondie de GPSR :** Pour une meilleure amélioration du protocole GPSR, il était indispensable de bien cerner ce protocole, comprendre son mécanisme ainsi que connaître ses atouts et ses limitations. Le protocole GPSR utilise deux principales stratégies : stratégie gourmande (*greedy*) et stratégie par périmètre qui n'est invoquée que si, et seulement si, la première stratégie échoue.

**4. Limitations de GPSR :** Après l'étude de l'existant, nous avons dégagé deux principales limitations qui apportent des restrictions au protocole GPSR. Nous citons d'une part, le manque de fiabilité des liaisons élues pour assurer l'acheminement des données, et d'autre part, le manque d'exploitation de la topologie. En réalité, le protocole GPSR utilise, lors de la décision de routage, uniquement la distance entre les voisins directs du transmetteur et la destination finale. Cela dit, le prochain saut choisi par le transmetteur ne sera pas forcément le meilleur. Effectivement, seule la distance est un critère très faible lorsqu'on veut assurer une QoS efficace sans pour autant engendrer de

mauvaises décisions de routage. Par ailleurs, GPSR permet de router les paquets vers un seul voisin voir une seule liaison, alors qu'il peut y avoir d'autres liaisons optimales capables de diffuser l'information en toute fiabilité. De plus, si la charge est équilibrée entre ces liaisons, nous pourrions éviter significativement la perte des paquets.

**5. Travaux existants :** Avant d'entamer l'optimisation et l'amélioration du protocole GPSR, nous avons présenté des exemples des travaux réalisés par différents chercheurs de ce domaine. Nous nous sommes intéressés aux variantes de GPSR implémentées dans les réseaux sans fil en général, notamment, dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), dans les réseaux MANET et celles implémentées dans les réseaux VANET.

**6. Implémentation de la première proposition FzGR (*Fuzzy Geographical Routing*) :** Cette première contribution se compose de deux démarches. La première calcule en temps réel le score pour chaque unique liaison (expéditeur-voisin), à partir de trois mesures de QoS, pour assurer une sélection plus fiable. Les trois mesures de QoS calculées à cette fin sont le délai de transmission, le débit du flux et la taille du tampon puisqu'elles affectent de manière substantielle la QoS. La deuxième démarche utilise la sortie pertinente et résultante de la première approche, et aussi la mesure de distance afin de respecter conformément les normes du protocole GPSR. La sortie de chaque démarche est calculée par le contrôleur de logique floue CLF (*Fuzzy Logic Controller*) [25].

**7. Implémentation de la seconde proposition MNH-FGR (*Multi Next Hop Fuzzy Geographical Routing Protocol*) :** GPSR et FzGR utilisent une seule liaison pour expédier des paquets dans un intervalle de temps donné. Néanmoins, cette liaison risque de s'encombrer de données, ce qui peut entraîner des pertes intéressantes. Notre idée repose sur le fait qu'il peut y avoir d'autres liens fonctionnels qui peuvent assurer un acheminement efficace de données avec une bonne QoS. En revanche, la charge entre les différentes liaisons participantes sera équilibrée et la topologie du réseau sera mieux exploitée.

La figure 2 schématise toutes les étapes de notre thèse.

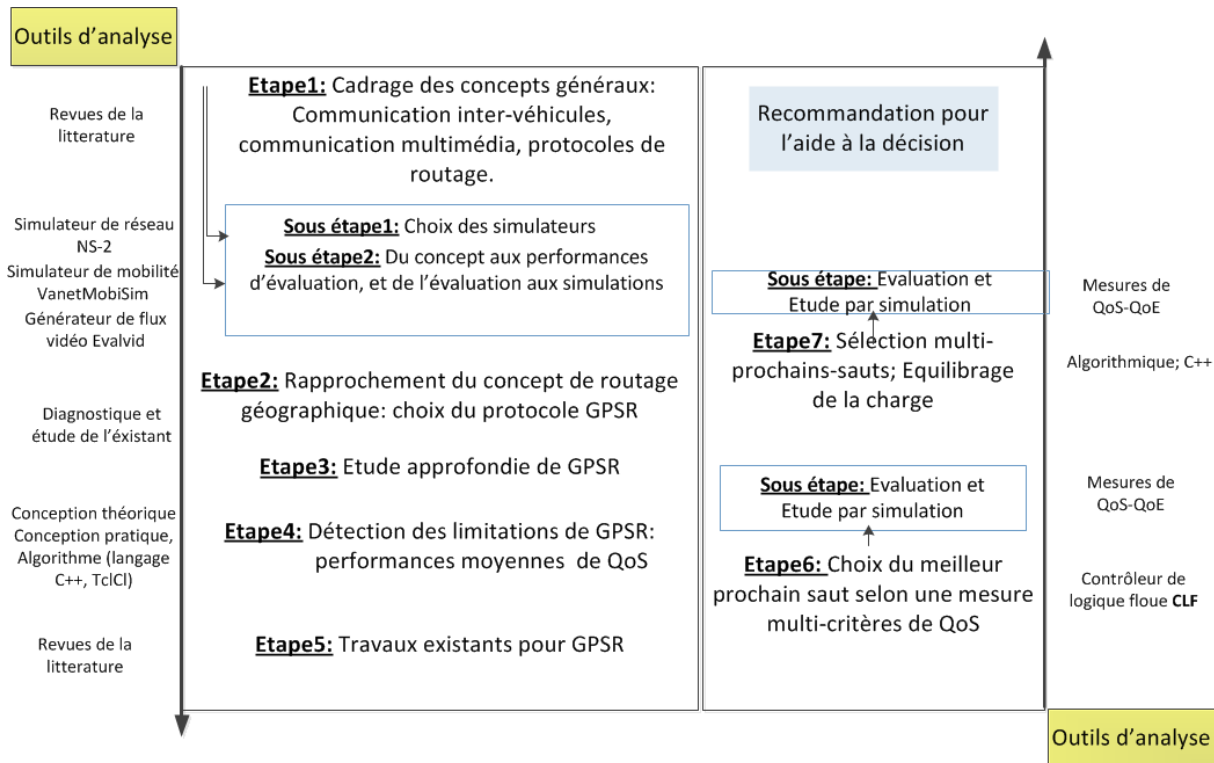


FIGURE 2 – Démarche méthodologique du travail de thèse

## Structuration du mémoire

Ce manuscrit s'articule autour de deux parties : théorique et pratique. La première discute les notions allant des systèmes STI jusqu'aux VANET en passant par les protocoles de routage (chapitres 1 et 2), alors que la deuxième reflète les contributions relatives à l'optimisation du routage géographique (chapitres 3, 4 et 5).

### Chapitre 1 : Réseaux véhiculaires ad-hoc - Généralités et état de l'art

Ce chapitre introduit la technologie VANET, le concept de la transmission inter-véhicules ainsi que celui du multimédia.

### Chapitre 2 : Protocoles de routage - État de l'art et étude par simulation

Ce chapitre introduit le problème du routage et donne également une classification répartie avec une description de dix différents algorithmes de routage sur lesquels nos travaux se baseront. L'évaluation des performances dans les réseaux VANET est présentée plus en détail. Ce chapitre révèle aussi un état de l'art des travaux comparatifs menés à cet égard. Par la suite, notre propre étude comparative est analysée en fonction de l'impact de la charge et de la densité sur la QoS et la QoE dans le réseau. Le chapitre sera clos par une synthèse générale qui relie nos résultats avec le monde réel.

### Chapitre 3 : GPSR - Étude de l'existant

Ce chapitre présente une étude approfondie du protocole GPSR. Dans un premier temps, des notations préliminaires adoptées dans la suite du manuscrit sont citées. Ensuite, le mode de fonctionnement du protocole GPSR est attentivement décrit afin de bien situer nos contributions.

#### **Chapitre 4 : Amélioration du protocole GPSR par une approche floue multi-critères**

Ce chapitre discute l'amélioration de la connectivité du réseau à l'aide d'une mesure multi-critères de QoS appliquée au protocole GPSR. En fait, grâce au principe de la logique floue, le choix du lien optimal ne dépendra plus que de la distance, mais dépendra aussi du débit, du délai et de la taille du tampon. Les différents modules du contrôleur de logique floue (CLF) sont détaillés et évalués. L'étude par simulation est minutieusement analysée dans le but de valider notre amélioration.

#### **Chapitre 5 : Technique de sélection multi-prochains-sauts associée à l'approche floue**

Ce chapitre est une continuité du précédent. Le but est d'exploiter tant que possible la topologie du réseau. En effet, GPSR n'utilise qu'un seul chemin optimal, alors qu'il peut y avoir d'autres liens fonctionnels avec une bonne QoS et qui peuvent assurer un acheminement efficace des données. L'équilibrage de la charge entre les différentes liaisons de la topologie est requis. Une étude expérimentale est maintenue afin de valider notre contribution.

Enfin, une conclusion générale est établie pour ce mémoire. Au cours de celle-ci, nous rappelons nos principales contributions avec quelques ouvertures et perspectives de recherche.

---

## Sommaire

1.1	Introduction . . . . .	<b>9</b>
1.2	Réseaux véhiculaires ad-hoc : architecture, communications et propriétés	<b>10</b>
1.2.1	Architecture d'un réseau VANET . . . . .	10
1.2.2	Communications dans un réseau VANET . . . . .	12
1.2.3	Noeud du réseau VANET . . . . .	13
1.2.4	Technologies de communication sans fil pour un réseau VANET	14
1.2.5	Caractéristiques et contraintes du réseau VANET . . . . .	16
1.3	Réseaux véhiculaires ad-hoc : applications multimédia . . . . .	<b>18</b>
1.3.1	Naissance du service <i>streaming</i> . . . . .	19
1.3.2	Méthodes de diffusion de la vidéo . . . . .	19
1.4	Conclusion . . . . .	<b>23</b>

---

### 1.1 Introduction

Depuis lors, une résolution universelle convoitant à incorporer les technologies de l'information et de la communication aux infrastructures routières ainsi qu'aux moyens de transport s'est dévoilée : les systèmes de transport intelligents (STI) [26]. Le STI vise à optimiser la gestion intégrale de plusieurs éléments, notamment les véhicules, les charges transportées et les voies de la route. Cette optimisation a pour but de promouvoir la sécurité et de promettre une bonne variété d'activités, à savoir, réduire l'usage des véhicules, minimiser le délai de transport et diminuer la consommation de carburant. Autrement dit, les systèmes STI contribuent à l'amélioration de la sécurité routière et à l'efficacité du transport routier [5].

Par ailleurs, les applications nécessaires pour mettre à profil un STI sont réparties selon quatre modalités d'emploi [7, 27]. En effet, elles peuvent être destinées aux véhicules, aux conducteurs, aux passagers ou à l'infrastructure. La première modalité touche l'information qui est envoyée aux véhicules afin d'adapter leurs automatismes, notamment pour la sécurité routière. La seconde modalité, quant à elle, regroupe les applications qui permettent au conducteur de faire une prospective de telle sorte qu'il adopte un meilleur usage de la route lorsqu'il assimile des renseignements sur les dangers à venir. En ce qui concerne la troisième dédiée aux passagers, l'existence des réseaux conçus initialement

pour la sûreté promet de nouveaux services à bord comme par exemple Internet [7, 28]. Enfin, du côté infrastructure, une bonne utilisation des ressources partagées sera possible lorsque les opérateurs publics ou privés acquièrent une information précise de leur état. Ceci va permettre aux conducteurs de minimiser le délai d'itinéraire mais aussi l'émission du CO<sub>2</sub> grâce à des conseils plus perspicaces.

Toutefois, afin de satisfaire un ample nombre d'applications, STI prend en charge deux types de communication sans fil [5] :

- ceux avec une longue portée, reposant principalement sur les réseaux d'infrastructure tel que WiMAX (IEEE 802.16), GSM ou la troisième génération 3G ;
- et ceux avec une courte portée, se basant sur les technologies émergentes tel que 802.11, ses variantes et le réseau VANET qui représente notre axe de recherche lors de cette thèse.

Bien que les réseaux VANET aient des avantages inhérents par rapport aux réseaux traditionnels, le problème d'assurer un service en temps réel ainsi qu'une QoS robuste demeure critique. En réalité, le changement rapide de la topologie, la perte fréquente de la connectivité, le retard significatif de la transmission, et bien d'autres faits font de ce type de réseau un environnement très compliqué [29].

Le réseau VANET est désormais passé de la phase de curiosité simpliste pour revêtir aujourd'hui un intérêt majeur, que ça soit auprès de l'industrie automobile ou de la communauté de recherche [29]. Il a été amplement étudié dans divers pays, à savoir, l'Europe, le Japon et l'Amérique du nord dans le but de donner naissance à des technologies inédites. À cet égard, les réseaux véhiculaires représentent un attrayant marché en termes de déploiement d'infrastructures réseau et de fourniture des services associés.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter l'architecture générale des VANET, les types et les technologies de communication ainsi que les avantages et les inconvénients majeurs de ce réseau (voir section 2). Ensuite, nous allons clarifier lors de la section 3, la notion de la transmission vidéo dans les VANET vu l'importance du domaine des applications multimédia dans le secteur véhiculaire. Enfin, le résumé du chapitre et les conclusions vont être présentés dans la section 4.

## 1.2 Réseaux véhiculaires ad-hoc : architecture, communications et propriétés

Nous présentons, dans cette section, l'architecture du réseau VANET [7], les types de communication existants ainsi que les technologies de communication sans fil potentielles pour ce type de réseaux. Par la suite, nous discutons la relation entre les applications multimédia et les VANET.

### 1.2.1 Architecture d'un réseau VANET

#### 1.2.1.1 Unité de bord OBU (*On Board Unit*)

Une communication routière incite qu'un véhicule doit être muni d'un appareil embarqué OBU [29] dans l'optique d'un environnement intelligent [30]. En fait, cet appareil permet aux véhicules de communiquer entre eux ou même avec des infrastructures dites RSU (*Road Side Unit*). Un OBU comprend un processeur qui contient à son tour différents constituants : une mémoire de lecture/écriture pour préserver et récupérer les données, une

interface utilisateur, une interface responsable de la connexion entre véhicules et un périphérique réseau pour une communication sans fil à courte portée basée sur la technologie radio IEEE 802.11p. Pour des usages autre que la sécurité, un OBU comprend également un périphérique de réseau avec d'autres technologies radio comme IEEE 802.11a/b/g/n. L'utilisation de cet appareil offre différentes fonctions qui s'avèrent importantes pour les VANET, notamment avoir l'accès radio sans fil, pouvoir acheminer les données selon un routage ad-hoc et géographique, contrôler la surcharge du réseau, transférer des messages fiables, et également assurer la sécurité des données.

### 1.2.1.2 Unité d'application UA (Application Unit)

L'unité d'application UA est un appareil embarqué au bord d'un véhicule. Cet appareil est connecté, d'une façon filaire ou sans fil, à l'OBU afin de faire tourner les applications fournies aux utilisateurs. En d'autres termes, l'UA communique avec le réseau uniquement par l'intermédiaire du système OBU qui prend en charge toutes les fonctions de mobilité et de réseau [29]. Il est à mentionner aussi que l'OBU et l'UA peuvent être trouvés dans une seule unité physique.

### 1.2.1.3 Unité du côté de la route RSU (Road Side Unit)

L'unité RSU n'est en fait qu'un dispositif fixé tout le long du bord de la route ou dans des emplacements précis tels que les jonctions ou les places de stationnement proches [29]. Le RSU est équipé d'un périphérique réseau basé sur la technologie radio IEEE 802.11p. Il peut comporter également d'autres périphériques réseau afin d'être utilisé dans le cadre de la communication avec infrastructures. Ce dispositif agit comme un routeur et possède une portée élevée par rapport à celle des véhicules. Ses fonctionnalités majeures sont :

- la délégation de l'information à d'autres OBU ou à d'autres RSU, qui transmettront à leur tour le message à d'autres OBU ;
- l'exécution des applications de sécurité telles que les avertissements aux dangers de la route ;
- et la connectivité Internet aux OBU.

La figure 1.1 illustre une vision générale de l'architecture des VANET avec ses différents composants.

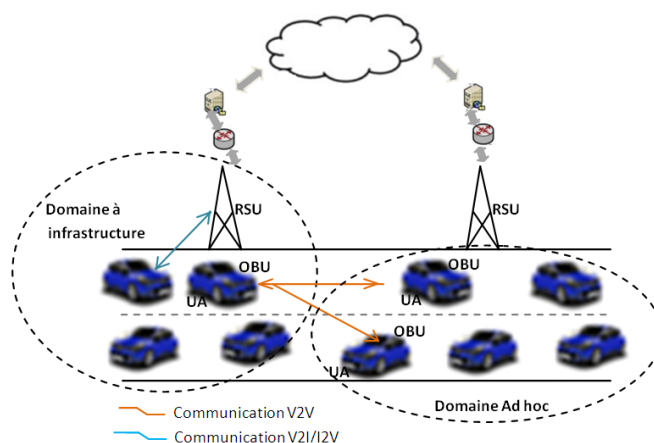


FIGURE 1.1 – Architecture du réseau VANET

## 1.2.2 Communications dans un réseau VANET

VANET représente une sous-classe de MANET (réseaux mobiles ad-hoc). Ce type de réseau est indépendant de n'importe quelle infrastructure fixe et connaît une topologie très active et variable. En effet, ce sont les véhicules qui contribuent à la performance globale du système de manière intermittente et imprévisible jouant ainsi le rôle de routeurs et présentant par la suite un haut niveau de fluidité et de disponibilité [24]. Les principaux critères qui différencient un réseau VANET d'un réseau MANET sont la mobilité instable, hautement dynamique, directionnelle et non aléatoire [2]. La durée de vie des noeuds est aussi un critère qui différencie les réseaux VANET des réseaux MANET. En effet, la notion d'énergie est significativement négligée pour les VANET en étant très élevée.

Par ailleurs, les VANET admettent différents types de communication illustrés dans la figure 1.2.

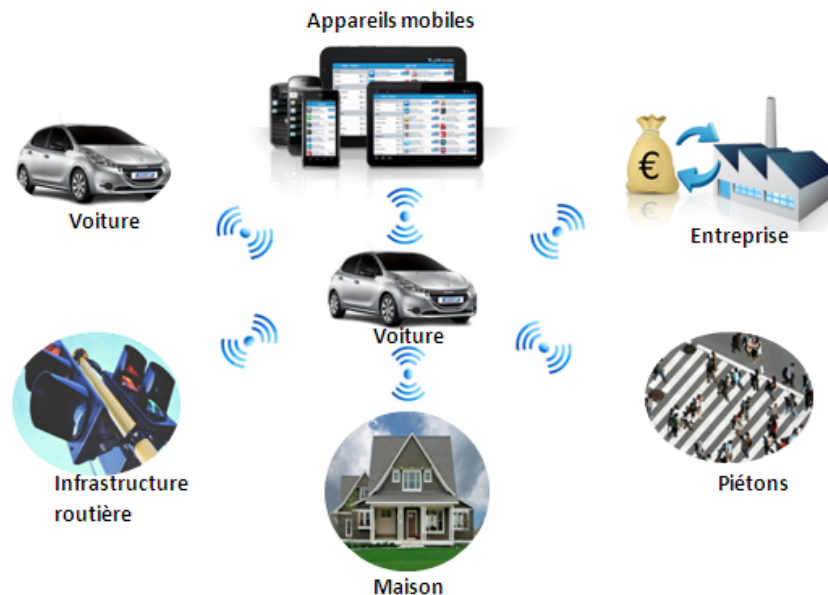


FIGURE 1.2 – Types de communication dans VANET

### 1.2.2.1 Communication V2V

Grâce à la communication V2V, tous les véhicules intelligents peuvent communiquer directement entre eux sans aucune infrastructure ou installation sur les routes, ce qui offre une communication moins coûteuse et plus flexible [15]. Pourtant, cette approche souffre de certains inconvénients tel que les déconnexions fréquentes dues à la forte mobilité des véhicules.

### 1.2.2.2 Communication V2I/I2V

Contrairement à la communication V2V, la communication V2I/I2V se focalise sur des systèmes de communication qui utilisent des stations de base ou des points d'infrastructure RSU. Cette approche repose sur le modèle client/serveur où les véhicules sont les clients et les stations RSU, installées le long de la route, sont les serveurs. De ce fait, toute communication doit obligatoirement passer par les RSU. Ces derniers peuvent offrir

aux usagers plusieurs services concernant le trafic, l'accès à Internet, l'échange de données voiture/domicile et même la communication de voiture/garage pour le diagnostic à distance. Par contre, l'inconvénient majeur est que l'installation des unités RSU s'avère une tâche coûteuse, que ce soit en terme de temps ou en terme de maintenance des stations.

### 1.2.2.3 Communication hybride

La combinaison des deux types de communication V2V et V2I/I2V conduit à former une communication hybride très intéressante. En effet, dans le cas où la portée radio des infrastructures est limitée, l'utilisation des véhicules comme relais permettra alors d'étendre cette distance. Ou encore, pour un but économique et afin d'éviter les stations de base à chaque coin de la rue, l'utilisation des sauts par des véhicules intermédiaires prendra toute son importance.

### 1.2.3 Noeud du réseau VANET

Pour qu'un véhicule puisse répondre aux exigences d'un réseau VANET, il doit absolument combler son architecture avec différents terminaux tels que des calculateurs, des interfaces réseaux, un système de localisation ainsi que des capteurs capables de collecter les informations et de les traiter.



FIGURE 1.3 – Composants physiques d'un véhicule intelligent

Un véhicule intelligent comporte principalement six composantes physiques [30] (voir la figure 1.3) :

**Unité de collecte de données EDR** (*Event Data Recoder*) qui est utilisée pour enregistrer les paramètres importants, à savoir, la vitesse, l'accélération, les événements importants comme les accidents, etc ;

**Radar d'arrière et radar d'avant** qui peuvent détecter des obstacles pour une distance allant jusqu'à 200 m ;

**Unité de calcul et de traitement** qui, grâce aux données provenant par les autres composantes du véhicule, génère des informations utiles à échanger avec d'autres véhicules ou avec l'infrastructure ;

**Unité de localisation GPS** avec laquelle tout véhicule peut localiser sa position et celle des autres véhicules ;

**Interface Homme/Machine** par laquelle le conducteur ou les passagers peuvent interagir avec le véhicule ;

**Équipement de communication** qui est responsable de toutes les transmissions entrantes et sortantes du véhicule. Effectivement, afin de pouvoir échanger des messages entre véhicules, l'ASTM (*American Society for Testing and Materials*) a adopté la norme sans fil DSRC (*Dedicated Short Range Communication*) en 2002. En 2003, le groupe de travail IEEE a repris ces travaux pour définir un nouveau standard nommé WAVE (*Wireless Ability in Vehicular Environments*) ou aussi IEEE 802.11p. Cette norme utilise le concept de multi canaux afin d'assurer des communications pour les applications de sécurité et les autres services du transport intelligent. La norme IEEE 802.11p a été adaptée pour prendre en charge les applications des STI. Nous donnons plus de détails sur la technologie DSRC dans la section 1.2.4.2.

#### 1.2.4 Technologies de communication sans fil pour un réseau VANET

Pour le déploiement des réseaux de véhicules, les réseaux sans fil peuvent être d'une grande utilité surtout si nous maîtrisons bien leurs technologies ainsi que les différents moyens de les mettre en oeuvre.

Avant de se décider sur le choix de la technologie adéquate pour la communication véhiculaire, il est nécessaire de donner en premier lieu un aperçu sur les différentes solutions radio existantes et leurs caractéristiques [10].

##### 1.2.4.1 Couvertures radio existantes

###### **WPAN (*Wireless Personal Area Network*) :**

Les réseaux sans fil personnels ou WPAN sont des réseaux à très faible portée de l'ordre d'une dizaine de mètres. Ils sont utilisés généralement dans le cadre de l'informatique vestimentaire qui consiste à faire communiquer des matériels entre eux. Ils sont également utilisés pour relier des équipements informatiques.

Pour mettre en oeuvre de tels réseaux, la principale technologie est IEEE 802.15.1 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.

###### **WLAN (*Wireless Local Area Network*) :**

Les réseaux locaux sans fil ou WLAN sont utilisés à l'intérieur des bâtiments : entreprises, universités, etc. Ils font le pont entre la téléphonie et l'informatique et possèdent de nombreux avantages, notamment :

- la mobilité des équipements informatiques ;
- la compatibilité des débits avec les applications informatiques actuelles ;
- les bandes de fréquences libres de droit d'utilisation ;
- l'absence d'infrastructure possible ;
- la mise en oeuvre aisée.

Malgré ces avantages, il est nécessaire d'équilibrer les WLAN à cause des interférences

radio, des problèmes de multi-trajets des ondes, des irrégularités électromagnétiques, etc. Par conséquent, ces réseaux sont moins sûrs que les réseaux filaires.

Les deux technologies sur lesquelles se base ce type de réseaux sont : a) IEEE 802.11 soutenue par WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), b) et HiperLan1/HiperLan2 soutenue par l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Ces technologies fournissent des transmissions radio théoriques allant jusqu'à 54 Mbit/s.

#### **WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) :**

Afin de couvrir des secteurs géographiques agités, où l'accès s'avère difficile à l'aide d'un réseau sans fil, les réseaux WMAN ont été conçus comme une éventuelle solution. Actuellement ces réseaux sont utilisés dans certaines villes américaines comme *San Francisco* afin de procurer aux citoyens un accès à Internet.

Les réseaux WMAN basés sur la technologie IEEE 802.16 ont une portée de quelques dizaines de kilomètres et une transmission radio estimée à 74 Mbit/s, en particulier pour IEEE 802.16-2004 dit WiMAX.

C'est également dans cette catégorie que peuvent être classés les réseaux téléphoniques de troisième génération qui utilisent la norme UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) pour transmettre de la voix et des données. Cette dernière admet des transmissions radio allant jusqu'à 2 Mbit/s sur plusieurs kilomètres.

#### **WWAN (*Wireless Wide Area Network*) :**

Les réseaux WWAN regroupent les réseaux cellulaires 1G et 2G mais également les réseaux satellitaires. Les réseaux cellulaires téléphoniques reposent sur des technologies comme GSM et GPRS (*General Packet Radio Service*). Les réseaux satellitaires s'appuient, quant à eux, sur des normes comme DVB-S (*Digital Video Broadcasting-Satellite*) pour transmettre l'information et proposent des débits élevés allant jusqu'à 40 Mbit/s.

**Synthèse :** Parmi toutes les technologies citées, aucune ne peut combler à la fois tous les besoins des applications CIV. Effectivement, WPAN est à écarter à cause de sa très faible couverture. De même pour WMAN qui nécessite une infrastructure importante et un investissement coûteux. WWAN est également marginalisé dû aux infrastructures fixes qui causent des retards importants et aux fréquentes transmissions de courte durée extrêmement coûteuses. En revanche, WLAN semble être la technologie la plus adaptée, non seulement en terme de portée et de 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 dans le domaine.

Dans la suite de cette partie, nous allons nous intéresser au standard IEEE 802.11 qui domine le domaine des réseaux WLAN.

#### **1.2.4.2 Standard IEEE 802.11- Technologie DSRC- Norme 802.11p**

Il faut savoir que le standard mondial IEEE 802.11 regroupe les propriétés du WLAN [31]. Il est le premier à fournir des débits de 1 ou 2 Mbps [31]. Dans le but d'optimiser le débit, de nouvelles variantes physiques ont vu le jour, notamment 802.11a, 802.11b et 802.11g. D'autres variantes ont été conçues pour assurer une meilleure sécurité et une

capacité de fonctionnement avec d'autres systèmes existants. Conformément au modèle OSI, le standard IEEE 802.11 prend part de deux couches, à savoir, la couche physique et la couche liaison de données (MAC) [31]. Toutefois, il demeure compatible avec le reste des couches.

Par ailleurs, quelques protocoles dédiés à l'environnement véhiculaire sont en cours de définition au sein de l'IEEE. En fait, l'ensemble de ces protocoles sont regroupés dans une technologie, appelée DSRC [26]. DSRC se base sur la couche physique et la couche MAC de la norme IEEE 802.11p. Cette dernière reprend le principe du CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) avec un complément qui gère la qualité de service et qui supporte le protocole de marquage de priorité. Ceci dit, le reste de la pile protocolaire de DSRC est en cours de standardisation par le groupe de travail IEEE 1609. La technologie DSRC supporte des vitesses allant jusqu'à 190 km/h, un débit de données allant de 6 Mbps jusqu'à 27 Mbps et des portées de transmission pouvant aller de 300 mètres jusqu'à 1000 mètres avec une modulation de type OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Visiblement, la recherche dans le domaine des VANET converge vers la norme IEEE 802.11p, une connexion Wi-Fi utilisée pour la communication véhiculaire de la norme WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) [32, 33]. Cette norme fournit des dispositifs de communication relativement bon marché mais puissants comme elle fournit également un accès à faible latence au support. IEEE 802.11p fonctionne sur sept canaux de 10 MHz dans la bande 5.8-5.9GHz selon, respectivement, la fédération FCC (*Federal Communication Commission*) et l'institut ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) [26]. Le premier canal est dédié au contrôle, quant au reste, ils sont destinés au service. Une réserve de 5MHz est prise en compte pour compléter les 75MHz.

Pour conclure, la technologie DSRC est utilisée dans la plus part des pays de l'Union Européenne mais avec une faible compatibilité. Pour y remédier, la normalisation se voit essentielle. Les normes régionales de DSRC sont données plus en détail par les auteurs de [34, 35, 36].

## 1.2.5 Caractéristiques et contraintes du réseau VANET

### 1.2.5.1 Caractéristiques

Les réseaux véhiculaires ont des caractéristiques spécifiques qui les distinguent des réseaux ad-hoc [37] :

#### **Collecte des informations et perception de l'environnement proche :**

La collecte de l'information se fait en utilisant différents capteurs de toutes catégories (caméras, capteurs de pollution, capteurs de pluies, capteurs de l'état de la route et de voiture, etc) qui permettent à tout conducteur à bord de son véhicule de disposer d'un certain nombre d'informations et d'une meilleure visibilité pour pouvoir réagir d'une manière adéquate aux changements de son environnement proche.

#### **Capacité d'énergie, de traitement et de communication :**

La contrainte d'énergie représente, généralement, l'une des problématiques traitées dans

le cadre des réseaux sans fil. En revanche, les éléments du réseau VANET ne connaissent pas de limite d'énergie, disposent d'une grande capacité de traitement et peuvent avoir plusieurs interfaces de communication (WIFI, Bluetooth et autres). En effet, avec la venue des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), le conducteur peut prendre une décision à l'aide des traitements et des interprétations des informations collectées.

#### **Environnement de déplacement et modèle de mobilité :**

Les réseaux ad-hoc mobiles sont souvent limités à des espaces ouverts ou *indoor* (cas pour une conférence), alors que les déplacements des véhicules dans les VANET sont liés aux structures des routes (autoroutes ou zones métropolitaines). Néanmoins, le modèle de mobilité dépend entièrement du comportement du conducteur.

#### **Forte mobilité, topologie du réseau et connectivité :**

Les véhicules dans les VANET sont caractérisés par une vitesse de déplacement très importante surtout dans les autoroutes. Par conséquent, un véhicule peut rejoindre ou quitter le réseau en peu de temps, ce qui rend les changements de topologie très fréquents.

#### **Diffusion de l'information :**

Un des objectifs des réseaux VANET est la sécurité routière. Les véhicules sont concernés par la diffusion de l'information en fonction de leurs positions géographiques et de leurs degrés d'implication dans l'évènement déclenché. Dans de telles situations, les communications sont principalement unidirectionnelles. Dans le cas général, elles s'axeront sur la diffusion à partir d'une source vers plusieurs destinataires.

#### *1.2.5.2 Contraintes*

Certes, un environnement VANET est très bénéfique, mais il faut aussi penser à tous les inconvénients qui peuvent impacter sévèrement la réalisation des objectifs visés. Nous présentons, dans ce qui suit, les contraintes les plus importantes.

#### **Faible connectivité du réseau :**

Afin d'assurer une bonne connectivité, les véhicules doivent être assez présents dans le réseau. En effet, cela permettra de trouver plus facilement les routes pour acheminer les données, d'éviter les ruptures de liaisons ainsi que de minimiser le délai de transmission. La variation de la densité est étroitement liée à la topologie (urbaine, rurale ou autoroute) et même au créneau pendant lequel les communications se déclenchent (heure de pointe ou vacances). C'est pourquoi la connectivité intéresse un grand nombre de chercheurs pour le développement des VANET.

#### **Sécurité dans les VANET :**

Garantir la sécurité et la confidentialité des données personnelles routées sur un réseau VANET demeure un constat critique. Plusieurs recherches ont prouvé que, contrairement aux MANET, les VANET révèlent de nouveaux défis de sécurité encore plus compliqués. Cela est dû principalement à la vulnérabilité de la communication sans fil utilisée.

**Exigences de QoS :**

Chaque application prise en charge par l'utilisateur a ses propres exigences en terme de QoS. En effet, les applications dédiées à la sécurité ne tolèrent en aucune façon le retard. Les applications en temps réel, quant à elles, nécessitent un accès garanti au canal, une rapidité de transmission, une utilisation étendue de la bande passante et un minimum de perte de données possible. D'autre part, les applications de divertissement ne prennent en compte que le taux de délivrance sans insister sur le retard puisque les données ne sont pas décisives. Par conséquent, vue la diversité des applications et de leurs besoins, le réseau VANET doit assumer une grande majorité des exigences de QoS.

**Présence des obstacles :**

Nombreux sont les obstacles qui bloquent ou brouillent les ondes radio des réseaux VANET. Ils peuvent être des véhicules, des bâtiments, des arbres ou des fleuves qui affaiblissent le signal ou l'empêchent d'atteindre sa destination. Comme conséquence, la fiabilité et la QoS seront affectées.

**Bande passante limitée :**

VANET est caractérisé par une communication purement ad-hoc, ce qui signifie l'absence totale de quelque infrastructure. Cette abstraction du coordinateur centralisé, qui contrôle normalement les communications et qui gère l'utilisation de la bande passante, risque de nuire à la délivrance des données. Dans ces conditions, le risque d'avoir une congestion sur le canal est fort probable surtout pour un environnement à haute densité où l'intervalle de fréquence est limité à seulement 75 MHz. Afin d'assurer une utilisation équitable des canaux sans collisions d'accès, les messages de contrôle doivent être échangés entre les véhicules. Pourtant, il est nécessaire de s'assurer que le coût du routage n'est pas impacté par cette solution.

**Protocole de routage :**

Un protocole de routage qui répond aux exigences requises par les applications véhiculaires est l'un des principaux défis dans VANET. Effectivement, le choix du protocole de routage est crucial de telle sorte qu'il peut affecter positivement plusieurs axes, notamment la fiabilité du système, la réduction des interférences causées par les obstacles, l'évolution du réseau, et le délai de délivrance des paquets surtout en cas d'urgence.

Les réseaux VANET possèdent des propriétés spécifiques qui contribuent à leur conception d'une façon non triviale. Après avoir cité les différentes caractéristiques et limitations, nous allons discuter dans la section qui suit leur déploiement dans le domaine des applications multimédia.

### 1.3 Réseaux véhiculaires ad-hoc : applications multimédia

Nous présentons dans cette section les connaissances basiques en termes d'application multimédia qui vont aider à la compréhension de cette thèse.

### 1.3.1 Naissance du service *streaming*

À partir des années 80, l’affichage du contenu multimédia a été observé pour la première fois à travers les ordinateurs [38]. Ces contenus étaient relativement simples pour devenir de plus en plus complexes au fil des années. Par la suite, la transmission vidéo en temps-réel a vu le jour dès l’apparition d’Internet de manière à pouvoir offrir une gamme de services élargie aux usagers de la route [7, 28]. Cependant, celle-ci nécessite des processeurs assez puissants pour supporter le décodage de la vidéo ainsi qu’une bande passante assez élevée pour la transmission.

À cette fin, le développement d’Internet s’est accéléré depuis l’année 2000. En effet, le débit est devenu beaucoup plus important et le nombre de personnes connectées a explosé. Certes, de nombreux services multimédia ont été mis en place, mais la transmission multimédia demeure limitée aux formats d’encodage bas débit.

Durant cette même période, on se servait de liaisons filaires, ce qui limitait la mobilité. C’est alors que la technologie *Wi-Fi* est apparue afin de permettre la connexion sans fil à Internet avec une très grande liberté de mouvement. Cela dit, cette liberté ne parvient pas à être amplement satisfaite à cause de la couverture radio restreinte entre le mobile et le point d’accès. En effet, cette couverture est de l’ordre d’une dizaine voir d’une centaine de mètres seulement. Ainsi, les réseaux véhiculaires purement ad-hoc, qui ne nécessitent ni liaison filaire ni point d’accès, présentent la nouvelle solution qui ne risque pas de bloquer la liberté de mouvement [38].

Par ailleurs, en adoptant les réseaux VANET, le téléchargement va prendre énormément de temps avant que le contenu ne soit disponible. En fait, si le contenu est téléchargé dans sa totalité, cela va nécessiter des espaces de stockage très importants et coûteux en fonction du format de la vidéo et de sa durée. Les utilisateurs, désirant un accès direct au contenu, vont alors devoir opter pour un nouveau type de service vidéo connu par le service *streaming*.

Le *streaming* permet de restituer presque instantanément le contenu vidéo et de démarrer l’affichage dès que les premières secondes sont téléchargées. De plus, ce mode de transmission permet de se passer d’un grand espace de stockage car le contenu est stocké en partie seulement sur le disque dur, tandis que l’affichage se fait au fur et à mesure. Également, en cas d’arrêt volontaire de la vidéo, seul le contenu visualisé est transféré sur le réseau et non pas toute la vidéo [38].

Les sites officiels de *streaming* les plus réputés, lancés en France dans les années 2005 et 2007, sont respectivement *Dailymotion* et *Youtube*.

### 1.3.2 Méthodes de diffusion de la vidéo

Le *streaming* traditionnel comprend des techniques simples de téléchargement et de diffusion en temps réel. Grâce à cette technique, les utilisateurs profitent d’un contenu vidéo téléchargé progressivement dans un tampon local, et dès qu’il y a suffisamment de données, la visualisation du média commence. Cependant, si le taux de lecture dépasse le taux de téléchargement, la lecture est retardée jusqu’à ce que les données soient téléchargées davantage. Ainsi, les systèmes de transmission vidéo traditionnels manquent de flexibilité et d’adaptabilité, de telle sorte que si le canal de transmission connaît une

congestion, la qualité de la vidéo peut se dégrader de manière significative.

En ce qui concerne le *streaming* adaptatif, c'est une technique qui estime la bande passante disponible et la capacité du CPU afin d'adapter la qualité vidéo fournie à l'utilisateur. Pour ce faire, des techniques ont été proposées : le transcodage et la commutation de flux. En réalité, la technique de transcodage n'est pas une solution appropriée pour les réseaux VANET en raison du manque de flexibilité et des exigences informatiques élevées en temps réel. Par conséquent, afin d'adapter de manière dynamique le flux vidéo, un mécanisme estimant la bande passante disponible a été pris en considération lors de l'élaboration de nos deux solutions de routage que nous allons défendre dans la suite de ce mémoire.

### 1.3.2.1 Codage vidéo évolutif

Le codage vidéo évolutif ou SVC (*Scalable video coding*) a été standardisé comme une extension de H.264/AVC. Une vidéo codée en utilisant H.264/SVC a une structure en couches qui correspond à différentes représentations spatiales et temporelles [39]. La principale caractéristique de SVC est qu'il fournit trois types différents d'évolutivité : spatial, temporel et qualité (voir la figure 1.4).

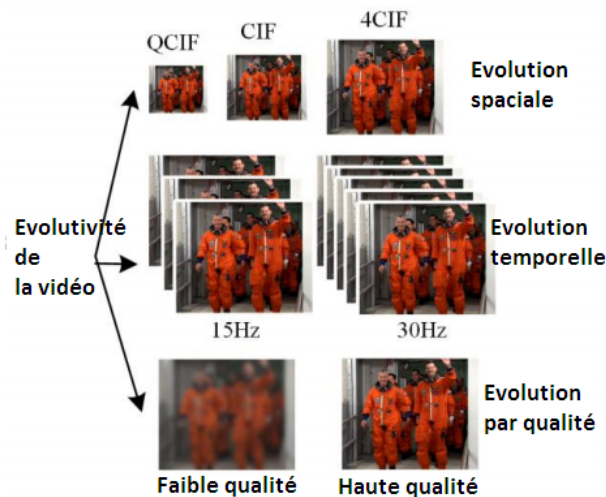


FIGURE 1.4 – H.264/SVC : différents types d'évolution

L'évolutivité dans le contexte SVC signifie que les informations vidéo peuvent être récupérées en décodant seulement une partie de la vidéo codée [39]. En effet, il est possible de décoder la vidéo à une résolution inférieure à celle de l'originale en décodant uniquement la couche spatiale la plus basse.

Le format CIF (*Common Intermediate Format*) est une définition standardisée d'image numérique définie par l'union internationale des télécommunications (ITU). Le tableau 1.1 spécifie les différents formats qui en dérivent.

TABLE 1.1 – Formats dérivés de CIF

Format	Pixel
CIF	352 x 288
SQCIF	128 x 96
QCIF	176 x 144
4CIF	704 x 576
9CIF	1056 x 864
16CIF	1408 x 1152

### 1.3.2.2 Compression vidéo et types d'encodage

Le type de vidéo libère un fichier volumineux de sorte qu'il est difficile de le transmettre de point en point d'un seul coup. Par conséquent, le fichier peut être corrompu si au moins un paquet est perdu, d'où l'utilité de la compression. En effet, en tant que routeurs, les véhicules coopèrent entre eux afin de diffuser de courtes vidéos de situations critiques dans le but d'informer visuellement les usagers de la route.

La vidéo non compressée offre une qualité maximale, mais avec un débit de données très élevé. Une variété de méthodes sont utilisées pour compresser les flux vidéo. Les plus efficaces sont ceux qui utilisent un groupe de photos pour réduire la redondance spatiale et temporelle (voir figure 1.5).

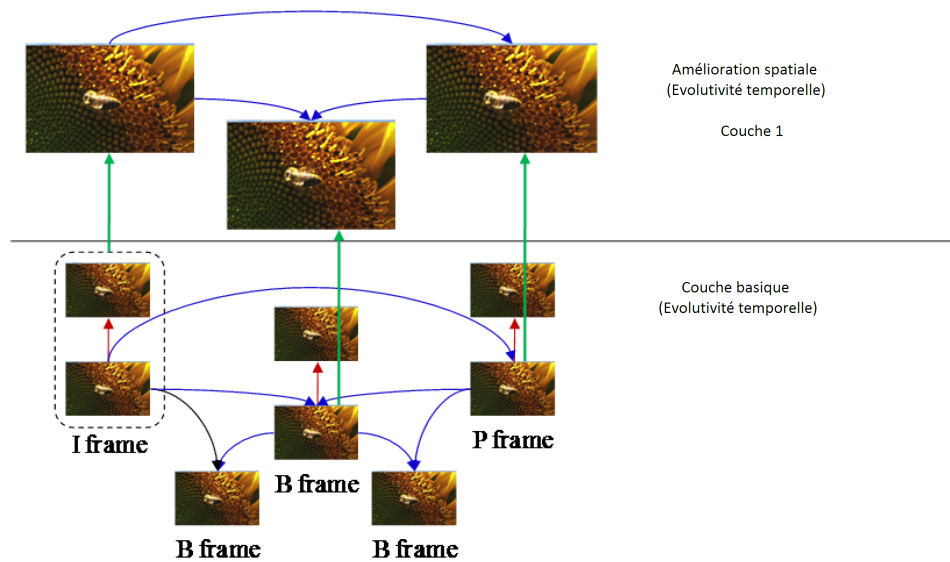


FIGURE 1.5 – Réduction de la redondance spatiale et temporelle

D'une manière générale, la redondance spatiale est réduite en enregistrant les différences entre les parties d'une seule image, ce qu'on appelle compression *intra-frame*. Cette dernière est étroitement liée à la compression d'image. De même, la redondance temporelle peut être réduite en enregistrant les différences entre les *frames*, ce qu'on appelle compression *inter-frame*, y compris la compensation de mouvement et d'autres techniques. Le tableau 1.2 définit les quatre principaux types de *frames* d'une vidéo.

Relativement aux types d'encodage existants, les normes les plus communes sont

MPEG-2 et MPEG-4. Le tableau 1.3 présente quelques variantes du groupe d'experts en images animées (MPEG) conçues pour divers objectifs.

TABLE 1.2 – Types de compression MPEG

Type	Mode	Description
I frame	Indépendante et Intra-codée	Points d'accès aléatoire. Utilisée comme référence pour coder d'autres <i>frames</i> . Compressée spatialement avec JPEG.
P frame	Prédite	Compressée temporellement en se basant sur la référence de la <i>frame</i> I ou P précédente). Puis compressée spatialement.
B frame	Prédite et Bidirectionnelle	Compressée temporellement en se basant sur les <i>frames</i> I et/ou P précédentes et suivantes. Puis compressée spatialement.
D frame	Prédite	Utilisée pour le mode de transfert rapide.

TABLE 1.3 – Exemples d'encodage vidéo

Année	Encodage	Description	Usage
1992	MPEG-1 [40]	Codage à débits allant jusqu'à 1,5 Mbps et une taille de 352x240p. Taille raisonnable mais mauvaise qualité.	Applications de stockage. Audio/vidéo : CD-ROM, VCD.
1994	MPEG-2 [40]	Codage à débits allant de 4 à 9 Mbps ; Grande résolution (720x480). Très bonne qualité mais la taille du fichier est énorme.	Applications de télévision numérique : SVCD, DVD, DVB.
–	MPEG-3	Outils déjà contenus dans MPEG-2. Arrêté et fusionné avec MPEG-2.	Applications HDTV.
1998	MPEG-4 [41]	Intégration du format audiovisuel Problèmes MPEG-1/MPEG-2 surmontés. Codage de fichiers entre 5 Kbps à 10 Mbps.	Nouvelles applications multimédia : téléchargement et diffusion sur Internet, jeux vidéo, multimédia mobile, 2D, 3D, télévision et HD média, catalogue image/video, dictionnaire, musical, etc.
2002	MPEG-7 [42]	Interface multimédia	

### 1.3.2.3 Structure d'une frame

Avant de conclure ce chapitre, nous devons définir la notion de *frame*. En fait, une *frame* est composée d'un ensemble d'images successives une après l'autre. Chaque ensemble horizontal d'éléments d'image représente une ligne. Les éléments d'image dans une ligne sont transmis sous forme de signaux sinusoïdaux de telle sorte que chaque paire (sombre, lumineux) peut être représentée par un seul sinus. Le produit du nombre de lignes et le nombre de signaux sinusoïdaux par ligne est connu comme la résolution totale de la trame. Plus la résolution est élevée, plus l'image affichée est similaire à l'image originale. Mais une résolution plus élevée présente des problèmes techniques et des coûts supplémentaires. Ainsi, un compromis devrait être atteint dans les conceptions des systèmes, à la fois pour une qualité d'image satisfaisante et pour un prix abordable.

## 1.4 Conclusion

Au cours de ces dernières années, les réseaux véhiculaires ont suscité un grand intérêt auprès des recherches scientifiques en raison de leur adaptabilité avec différents environnements. Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les concepts de base des réseaux VANET. Notamment, nous avons défini l'architecture du réseau, les types de communication, la structure du noeud véhiculaire et les différents modèles de livraison de données. Notre objectif était de discuter quelques axes nécessaires pour la bonne assimilation de la suite de ce mémoire. Une seconde partie a été consacrée spécifiquement au concept multimédia. En particulier, nous avons présenté le service *streaming*, les principales formes de compression vidéo et les types d'encodage existants.

La question qui se pose maintenant, et qui fera l'objet du chapitre suivant, c'est comment acheminer les informations diffusées? Les protocoles de routage sont la réponse. Toutefois, ils se caractérisent par une grande complexité et doivent être adaptés au dynamisme des réseaux VANET. Ces exigences poussent les scientifiques à créer de nouvelles approches d'acheminement de données. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les principales solutions de routage existantes qui visent à améliorer les performances des réseaux VANET.



---

**Sommaire**

2.1	Introduction . . . . .	<b>25</b>
2.2	Protocoles de routage : classification et description . . . . .	<b>26</b>
2.2.1	Protocoles basés sur la topologie . . . . .	27
2.2.2	Protocoles basés sur la position . . . . .	34
2.3	Travaux comparatifs antérieurs . . . . .	<b>37</b>
2.4	Environnement de simulation . . . . .	<b>39</b>
2.4.1	Critères d'évaluation des performances . . . . .	39
2.4.2	Vue d'ensemble sur les simulateurs exploités . . . . .	42
2.4.3	Paramètres de simulation . . . . .	48
2.5	Étude comparative par rapport au flux vidéo . . . . .	<b>49</b>
2.5.1	Analyse des résultats de QoS . . . . .	49
2.5.2	Analyse des résultats de QoE . . . . .	56
2.5.3	Discussion générale des résultats de QoS et de QoE . . . . .	58
2.6	Résultats de simulation face aux tendances de la qualité de vidéo . . .	<b>59</b>
2.7	Conclusion . . . . .	<b>60</b>

---

**2.1 Introduction**

Dans un réseau véhiculaire purement ad-hoc, les véhicules contribuent pleinement à la performance globale du système de manière intermittente et imprévisible présentant ainsi un haut niveau de fluidité et de disponibilité [24]. Dans ce contexte, de nombreux défis ont été soulevés tels que la sécurité, la connectivité, le routage et la gestion de la mobilité [43] ; en revanche, la source d'énergie rechargeable, la puissance de traitement et l'efficacité du stockage ne font pas l'objet d'une problématique dans ce domaine [37]. Notre intérêt majeur, dans cette thèse, se penche principalement sur le routage ad-hoc. Sous ce rapport, il serait peut-être plus opportun de proposer des solutions susceptibles de supporter la transmission vidéo afin que celle-ci soit exploitée efficacement dans une large gamme de services allant des applications de sécurité jusqu'à celles dédiées au divertissement [19].

Certes, comme mentionné par les auteurs de [44], avec les besoins croissants d'accéder à diverses ressources pendant la mobilité, des techniques efficaces incluant la convivialité, la disponibilité et l'intégrité du service, sont nécessaires pour garantir la satisfaction de

l'utilisateur. Par conséquent, un protocole de routage optimal devrait assurer une intégrité et une meilleure livraison en une durée très limitée afin de fournir une protection sûre et un voyage serein aux usagers de la route [45]. Ceci dit, même s'il existe plusieurs études scientifiques consacrées aux protocoles de routage [2, 44, 20, 46, 47], la comparaison demeure impertinente et l'étude de la perception de l'utilisateur lors des échanges de vidéos reste incomplète. Pour cette raison, nous déduisons que la littérature a révélé un manque des exigences de qualité de service (QoS) et de qualité de l'expérience (QoE) par rapport au flux vidéo dans les réseaux VANET. Ainsi, il n'est toujours pas clair quels sont les protocoles aptes à subvenir aux besoins de l'utilisateur, que ça soit un conducteur ou un passager, dans le contexte multimédia.

Pour répondre aux contraintes mentionnées ci-dessus, l'objectif principal de ce chapitre est de fournir une meilleure comparaison qualitative et quantitative de dix différents protocoles de routage compte tenu de la transmission vidéo sur une topologie urbaine [48, 49]. Nous avons été motivé, d'une part, par le rôle significatif que jouent les applications multimédia, soit dans le monde industriel ou dans la vie quotidienne de la route ; d'autre part, un scénario urbain se caractérise par une mobilité limitée ainsi que par différents obstacles comme les arbres, les bâtiments, les magasins et bien d'autres handicaps qui entraînent des complexités dans la communication [50, 51]. Par conséquent, un milieu urbain offre beaucoup plus de problèmes à résoudre [52], d'où le choix de travailler dans cet environnement. Le point culminant de notre étude comparative est de sélectionner un ensemble de protocoles pouvant supporter la transmission vidéo dans un environnement très dynamique et compliqué tel que VANET. L'objectif est de donner l'opportunité aux chercheurs d'envisager une stratégie de routage en fonction de son applicabilité par rapport à une qualité de vidéo particulière.

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous allons présenter la classification de plusieurs protocoles tout en décrivant le mécanisme de routage d'une dizaine d'entre eux (section 2.2). Par la suite, nous allons citer des exemples de constatations tirées des études comparatives antérieures (section 2.3). Nous allons aborder, après, les métriques nécessaires pour l'évaluation des performances dans un environnement VANET, en particulier les notions de QoS et de QoE (section 2.4). Ensuite, nous allons mener une étude comparative où nous allons analyser les résultats obtenus pour les dix protocoles de routage déjà décrits (section 2.5). Avant de terminer notre chapitre, il convient de se procurer une synthèse générale de l'étude établie, où nous allons montrer l'importance du routage géographique pour un réseau VANET (section 2.6). Enfin, le résumé du chapitre et les conclusions sont présentés dans la section 2.7.

## 2.2 Protocoles de routage : classification et description

Nous croyons, comme beaucoup d'autres auteurs [53, 23, 54], à la possibilité d'utiliser des protocoles MANET pour des scénarios VANET vu que les deux types en question partagent des propriétés communes comme le mouvement vivace et l'auto organisation des noeuds.

Politique de routage																						
Stratégies de routage					Information de routage																	
MultiCast		AnyCast	Broadcast	UniCast	Routage basé sur la topologie					Routage basé sur la position												
Cluster	GeoCast				Pro-Actif		Reactif			Hybride	DTN	Non-DTN			Hybride							
					Vecteur distance	Etat de lien	Saut par saut	Routage à source	Beacon			Beacon	Hybride									
COIN	MobiCast	ZOR	A-AODV	DV-CAST	DIR	DSDV	FSR	OLSR	AODV	DYMOUM	DSR	ZRP	ZHLS	VADD	GPSR	ASTAR	GY-TAR	CAR	CBF	TO-GO	Geo DTN +NAV	HLAR

FIGURE 2.1 – Taxonomie des protocoles de routage - Les parties coloriées représentent les protocoles étudiés

De ce fait, dix pertinents protocoles de routage seront étudiés (voir figure 2.1) :

### Protocoles basés sur la topologie :

- 1) Protocoles réactifs : AODV (*Ad-hoc On demand Distance Vector*) [55], DSR (*Dynamic Source Routing*) [56], DYMO (*Dynamic Manet On Demand*) [57] ;
- 2) Protocoles pro-actifs : DSDV (*Destination Sequence Distance Vector*) [58], FSR (*Fisheye State Routing*) [59], OLSR (*Optimized Link State Routing*) [60] ;
- 3) Protocole hybride : ZRP (*Zone Routing Protocol*) [61]

### Protocoles basés sur la position géographique :

- 1) Protocole non tolérant au retard N-DTN : GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [62] ;
- 2) Protocole tolérant au retard : HLAR (*Hybrid Location-based Ad-hoc Routing*) [63] ;
- 3) Protocole hybride : VADD (*Vehicle-Assisted Data Delivery*) [64]

Dans les paragraphes suivants, nous donnons plus de détails sur le mécanisme d'exploitation de chacun de ces dix protocoles tout en mettant l'accent sur leurs principaux avantages et inconvénients.

## 2.2.1 Protocoles basés sur la topologie

Les mécanismes de routage basés sur la topologie utilisent les connaissances des liens afin de transférer les données depuis la source vers la destination. Cette approche est classée en trois grandes parties : routage pro-actif, réactif et hybride.

### 2.2.1.1 Protocoles de routage réactifs (à la demande)

L'utilité des protocoles réactifs est d'établir la découverte d'itinéraire seulement lorsqu'un noeud doit interagir avec un autre noeud. Dans ce cas, il n'y a pas d'inondation sur le réseau pour mettre à jour la table de routage, sauf en cas de demande. Dans

cette partie, AODV, DSR et DYMOUM sont discutés avec leurs principaux avantages et inconvénients (voir tableau 2.2). Cependant, étant donné que les trois protocoles sont approximativement similaires avec une petite différence dans leur stratégie réactive, la figure 2.2 interprète le mécanisme typique de la démarche réactive.

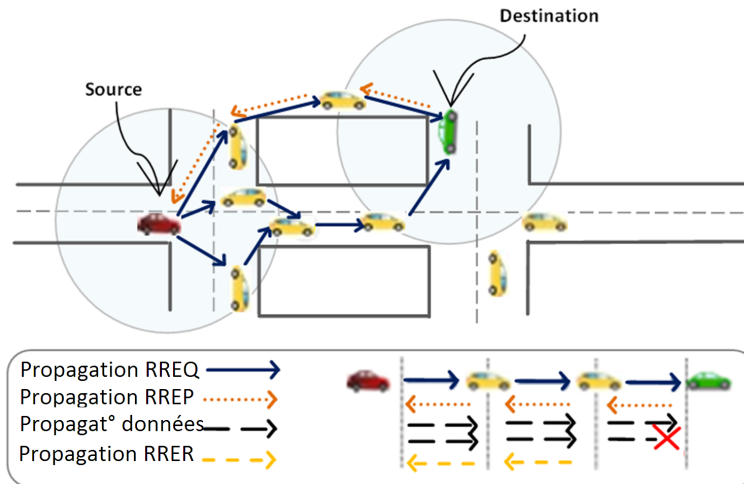


FIGURE 2.2 – Protocoles réactifs - Demandes échangées

a) Protocole ad-hoc à vecteur de distance à la demande (AODV)

AODV vise à réduire les messages de diffusion en découvrant des itinéraires seulement en cas de demande [55]. En effet, en fonction des messages de contrôle présentés dans le tableau 2.1, une méthodologie d'apprentissage inverse est adoptée pour atteindre cet objectif.

Tout d'abord, la source diffuse un paquet de demande d'itinéraire RREQ (*Route REquest Query*) à ses voisins. Ensuite, lors de la réception du RREQ, chaque nœud met dans sa table de routage l'adresse du saut précédent à partir duquel le paquet est envoyé, le nombre de sauts à partir de la source ainsi que la durée de vie. Lorsque le RREQ atteint la destination, le paquet de réponse d'itinéraire RREP (*Route REPLY*) est envoyé de manière inverse au nœud source à travers le chemin déjà conçu. Par ce moyen, chaque nœud participant met une entrée de l'itinéraire vers sa destination dans sa table de routage. Ensuite, le nœud source utilise celui (l'itinéraire) qui a le nombre minimale de sauts. En cas de rupture de lien, la source est avertie au moyen d'un message d'erreur RERR (*Route ERRor*) et un nouveau processus de découverte est lancé.

Paquet RREQ				
Adresse IP de la source	Adresse IP de destination	Num. Séquence de la source	Num. Séquence de destination	id de diffusion
Paquet RREP				
Adresse IP de destination	Num. Séquence de destination	Source adresse IP	Nombre de sauts	Durée de vie

TABLE 2.1 – Paquets de contrôle utilisés par AODV pour la découverte des routes

Toutefois, plusieurs études ont été introduites pour le protocole AODV afin d'améliorer son mécanisme de découverte d'itinéraires. En effet, les chercheurs dans [65] ont amélioré le protocole AODV en identifiant les cas où des chemins non idéaux sont créés et des paquets de contrôle sans importance sont générés afin de les éviter par la suite. Une autre méthodologie de routage basée sur la QoS est proposée par les auteurs de [66] afin de trouver, au cours du processus de découverte, un itinéraire qui permettra d'obtenir une grande QoS dans un environnement très compliqué et actif. De plus, les auteurs de [44, 67] affirment que les liens conçus par AODV se brisent assez souvent. À cette fin, ils ont proposé PRAODV qui utilise l'information de vitesse des noeuds pour prédire la durée de vie des liens. Ainsi, lorsqu'un lien échoue, la nouvelle route est construite avant la fin de la durée de vie estimée de l'itinéraire. Les auteurs ont également proposé un PRAODV amélioré, défini par PRAODVM, qui sélectionne le chemin le plus court avec la durée de vie prévue par prédiction.

#### *b) Routage à source dynamique (DSR)*

DSR est spécialement conçu pour les réseaux ad-hoc sans fil à plusieurs sauts. Contrairement à d'autres protocoles, DSR utilise la technique du routage source avec laquelle le noeud source indique la séquence des noeuds intermédiaires pour atteindre la destination. Les deux opérations, i.e. découverte de route et maintenance de route, sont effectuées par DSR de la même façon que par AODV, sauf que c'est sans apprentissage inverse. Premièrement, le noeud source diffuse le paquet RREQ vers ses voisins [56]. L'en-tête du paquet porte l'adresse de chaque noeud traversé. Lors de la réception du paquet RREQ, la destination envoie en retour le paquet RREP à la source à l'aide du chemin inverse stocké dans le paquet RREQ. Le noeud source peut désormais envoyer des données à la destination après avoir stocké, dans le cache, un ou plusieurs chemins à partir du message RREP. En cas d'échec au niveau d'un noeud intermédiaire, ce dernier renvoie le message RERR à la source. Ensuite, un autre chemin est utilisé, s'il existe bien évidemment dans le cache. Dans le cas contraire, la découverte de l'itinéraire se fait à nouveau.

#### *c) Protocole dynamique à la demande (DYMOUM)*

Le protocole de routage DYMOUM, connu aussi sous le nom de DYMO, est le successeur du protocole de routage AODV. Il a été développé par l'organisme *Internet engineering task force* [57]. L'idée était de simplifier AODV tout en conservant le mode de fonctionnement de base. DYMOUM adopte également un mécanisme de découverte des routes et un autre pour la maintenance des itinéraires [68]. La découverte de l'itinéraire est très similaire à celle de AODV à l'exception de la fonctionnalité d'accumulation de chemin. En effet, les routes sont découvertes à la demande seulement lorsqu'un noeud doit envoyer un paquet à une destination qui n'est actuellement pas dans sa table de routage. Au départ, le message RREQ est inondé dans le réseau à l'aide de la diffusion, puis, dès que le paquet atteint sa destination, le message RREP contenant le chemin accumulé est alors renvoyé. Lors de la diffusion du message RREQ, le noeud intermédiaire joindra son adresse au message. Chaque noeud intermédiaire qui diffuse le message RREQ prend une

note du chemin inverse.

TABLE 2.2 – Protocoles AODV, DSR et DYMOUM - Avantages et inconvénients

Protocoles	Avantages	Inconvénients
AODV	Mises à jours des itinéraires source/destination Réduction des exigences de mémoire Contournement des itinéraires dupliqués Possession d'un mécanisme de secours en cas d'erreur de routes Approbation des réseaux ad-hoc à grande échelle	Retard de transmission causé par la découverte Incohérence dans la route due aux entrées périmées au niveau des noeuds intermédiaires Production d'une lourde surcharge au niveau du réseau Surplus par rapport à la consommation de bande passante
DSR	Moins de paquets de contrôles Utilisation de la mémoire cache : stockage des itinéraires valides Redécouverte non appliquée dans le cas des route existantes	Inefficacité dans le cas d'une très forte mobilité : beaucoup de paquets perdus Réparation locale des liens brisés impossible
DYMOUM	Consommation minimale de mémoire par la table de routage Diminution de la surcharge avec l'augmentation de la taille du réseau et de la mobilité	Surcharge très élevée et non nécessaire Congestion : retransmission des paquets Inefficace avec une mobilité très faible

### 2.2.1.2 Protocoles de routage pro-actifs

Les protocoles de routage pro-actifs permettent à chaque noeud de maintenir une table dans laquelle toutes les informations relatives aux noeuds connectés sont disponibles. À Chaque fois que des modifications se produisent dans la topologie du réseau, chaque noeud mettra à jour sa table de routage. Cette catégorie de protocoles utilise l'algorithme du chemin le plus court depuis la source vers la destination. DSDV, FSR et OLSR sont considérés comme des exemples de mécanismes pro-actifs. Leurs principales caractéristiques sont indiquées dans le tableau 2.3.

#### a) Destination à vecteur de distance séquentiel (DSDV)

DSDV implémente l'algorithme du vecteur de distance [58]. Deux types de tables sont maintenues à chaque noeud, à savoir, les tables de routage et les tables du temps de réglage. De manière générale, la table de routage contient l'adresse de tous les autres noeuds du réseau (voir la figure 2.3 (a)). Elle comprend également l'adresse du prochain saut, la métrique d'itinéraire et le numéro de séquence produit par la destination. En ce

qui concerne la deuxième table, elle inclut l'heure de la mise à jour pour chaque destination. Avec DSDV, chaque noeud échange avec le reste des noeuds sa table de routage de manière dynamique et périodique afin d'exploiter de nouvelles informations. Ainsi, le chemin le plus court possible vers la destination pourrait être examiné. En outre, les routes avec le numéro de séquence ultérieur sont sélectionnées, et si ces nombres de séquence sont identiques, la décision est prise sur la plus petite métrique. DSDV assure des itinéraires sans boucles en utilisant l'idée classique de Bellman-Ford. Cependant, il présente certaines limitations causés par le problème des liens unidirectionnels.

*b) Routage d'état de l'oeil de poisson (FSR)*

FSR est un protocole de routage hiérarchique implicite [59]. Il implémente la stratégie d'état de liaison qui rend chaque noeud capable de maintenir une carte de topologie complète. Dans le contexte de l'oeil de poisson, la capacité de voir des objets est meilleure lorsqu'ils sont plus proches du point focal. Dans le cadre des réseaux sans fil, chaque noeud conserve des informations précises sur les noeuds les plus proches par opposition aux noeuds lointains dont l'information est imprécise. Ainsi, la portée de l'oeil de poisson est définie comme l'ensemble des noeuds pouvant être atteints dans un certain nombre de sauts (voir la figure 2.3 (b)). Le nombre de niveaux et le rayon de chaque champ dépendent de la taille du réseau. Les entrées correspondantes aux noeuds dans la portée la plus petite sont propagées aux voisins dont la fréquence est plus élevée. D'autre part, les échanges dans les étendues plus petites sont plus fréquents que dans les plus grandes, ce qui rend les informations de topologie pour les noeuds proches plus précises que pour les noeuds plus lointains. Cependant, même si un noeud n'a pas une information précise sur les noeuds lointains, les paquets seront routés correctement car les informations sur l'itinéraire deviennent de plus en plus précises lorsque le paquet se rapproche de la destination.

*c) Routage d'état de lien optimisé (OLSR)*

OLSR est une conception d'état de lien améliorée et basée sur le routage point à point, qui fournit les itinéraires disponibles au moment nécessaire [60]. L'utilisation du mécanisme de relais multipoint (MPR) dans OLSR est la caractéristique distinctive par rapport aux autres protocoles classiques d'état de lien. En effet, seuls les noeuds sélectionnés comme MPR peuvent transmettre le trafic de contrôle. Les trois messages de contrôle qu'utilise OLSR sont le message HELLO, le message de contrôle de topologie (CT) et le message de déclaration d'interface multiple (DIM).

Les paquets HELLO et CT sont générés afin de créer et de maintenir des tables de routage qui contiennent la destination, le prochain saut et le nombre de sauts total vers la destination. En fait, chaque noeud sélectionne un ensemble de noeuds MPR voisins pour envoyer les paquets. Tout noeud n'appartenant pas à cet ensemble ne peut que lire et traiter le paquet. Pour sélectionner les MPR, chaque noeud diffuse périodiquement une liste de ses voisins aux prochains sauts en utilisant les messages HELLO. À partir de cette liste, chaque noeud sélectionne un sous-ensemble de voisins à un saut qui couvre tous les voisins à deux sauts. Par exemple, dans la figure 2.3 (c), la voiture rouge peut sélectionner

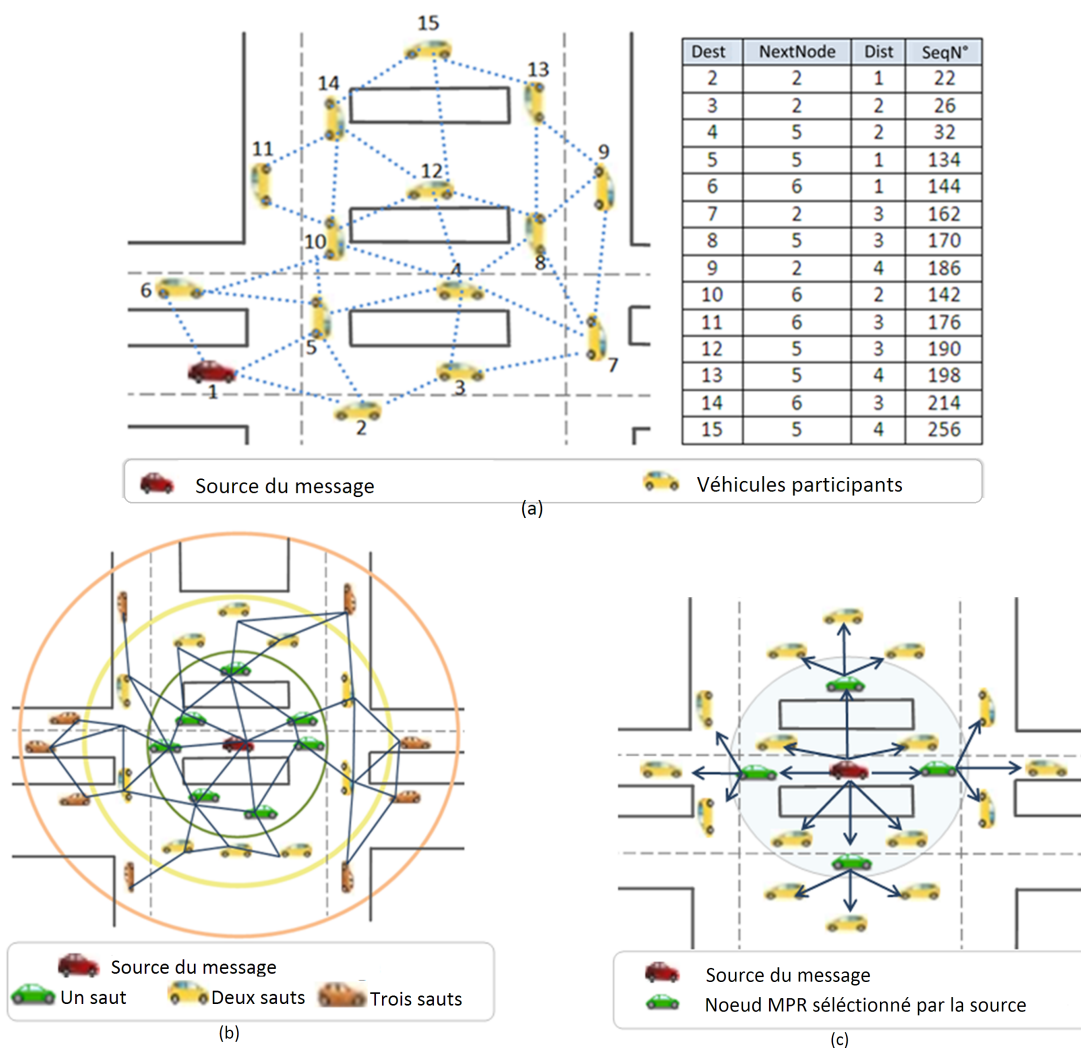


FIGURE 2.3 – Protocoles pro-actifs - Mécanismes de fonctionnement : a) DSDV, b) FSR et c) OLSR

les quatre voitures vertes comme étant les noeuds MPR. Ces derniers sont stockés dans un message CT, qui sert à diffuser des informations topologiques sur l'ensemble du réseau. Par conséquent, chaque noeud détermine une route optimale pour chaque destination connue en utilisant ses informations de topologie et les stocke dans une table de routage. Par la suite, les routes vers toutes les destinations sont immédiatement disponibles lorsque la transmission des données commence. En revanche, le message DIM, lui, est inondé dans le réseau par les noeuds MPR et il est utilisé pour annoncer que le noeud exécute OLSR sur plus que d'une seule interface.

TABLE 2.3 – Protocoles DSDV, FSR et OLSR - Avantages et inconvénients

Protocoles	Avantages	Inconvénients
DSDV	Découverte d'itinéraire non nécessaire Maintenance du meilleur chemin au lieu de plusieurs chemins Réduction de la quantité d'espace dans la table de routage	Non-support du routage à plusieurs chemins (multipathing) Difficulté de déterminer le retard pour l'avertissement des routes Surcharge dans le réseau
FSR	Réduction de la bande passante consommée Réduction de la surcharge Ne déclenche aucun message de contrôle en cas de rupture de liaison	Inefficacité dans les réseaux limités Moins de connaissances sur les noeuds lointains Insuffisance d'informations pour l'établissement des itinéraires
OLSR	Réduction de la retransmission des paquets Convenance aux réseaux à haute densité Prise en charge des applications nécessitant un court délais de transmission	Nécessité d'une grande quantité de bande passante et d'un processeur puissant afin de calculer le chemin optimal Congestion sur le réseau en raison des envois fréquents des paquets de contrôle

### 2.2.1.3 Protocoles de routage hybrides

#### a) Protocole de routage de zone (ZRP)

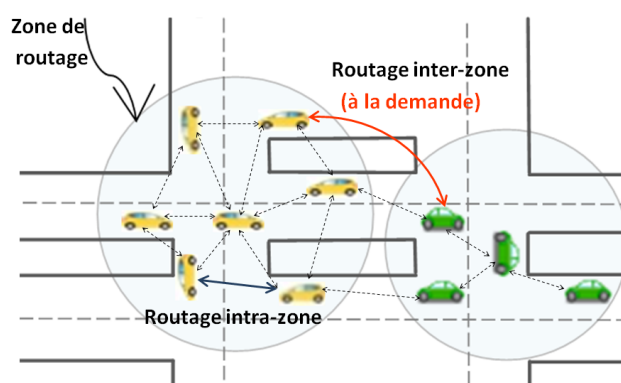


FIGURE 2.4 – Protocoles hybrides - Concept du protocole ZRP

Les protocoles hybrides sont un mélange de protocoles de routage réactifs et pro-actifs [69]. La plupart de ces protocoles sont basés sur la notion de zone. Cela veut dire que les noeuds sont répartis dans différentes zones, rendant ainsi la détection et la maintenance des itinéraires plus fiables.

Nous abordons, dans cette partie, le meilleur et le premier protocole hybride développé pour les réseaux à grande échelle : ZRP [61]. Nous présentons ses plus importants avantages

et inconvénients dans le tableau 2.4. La figure 2.4 illustre sa fonctionnalité qui se configure simultanément comme suit :

- un routage pro-actif, exécuté par le protocole IARP (*Inter-zone Routing Protocol*) dans une zone restreinte. Celui là permet de mettre à jour l'état du réseau et de maintenir les routes pour vérifier s'il existe des paquets de données qui circulent.

- un routage réactif, entre les zones restreintes, exécuté par le protocole IERP (*Inter-zone Routing Protocol*). Celui-ci détermine un itinéraire entre les noeuds périphériques, si nécessaire.

TABLE 2.4 – Protocole ZRP - Avantages et inconvénients

Protocole	Avantages	Inconvénients
ZRP	Réduction de la charge causée par IARP et IERP Gestion du retard causé par IERP	Non fonctionnel pour les topologies très dynamiques et en perpétuel changement La taille de la zone est prédéfinie, fixe et ne peut pas être modifiée après implémentation

## 2.2.2 Protocoles basés sur la position

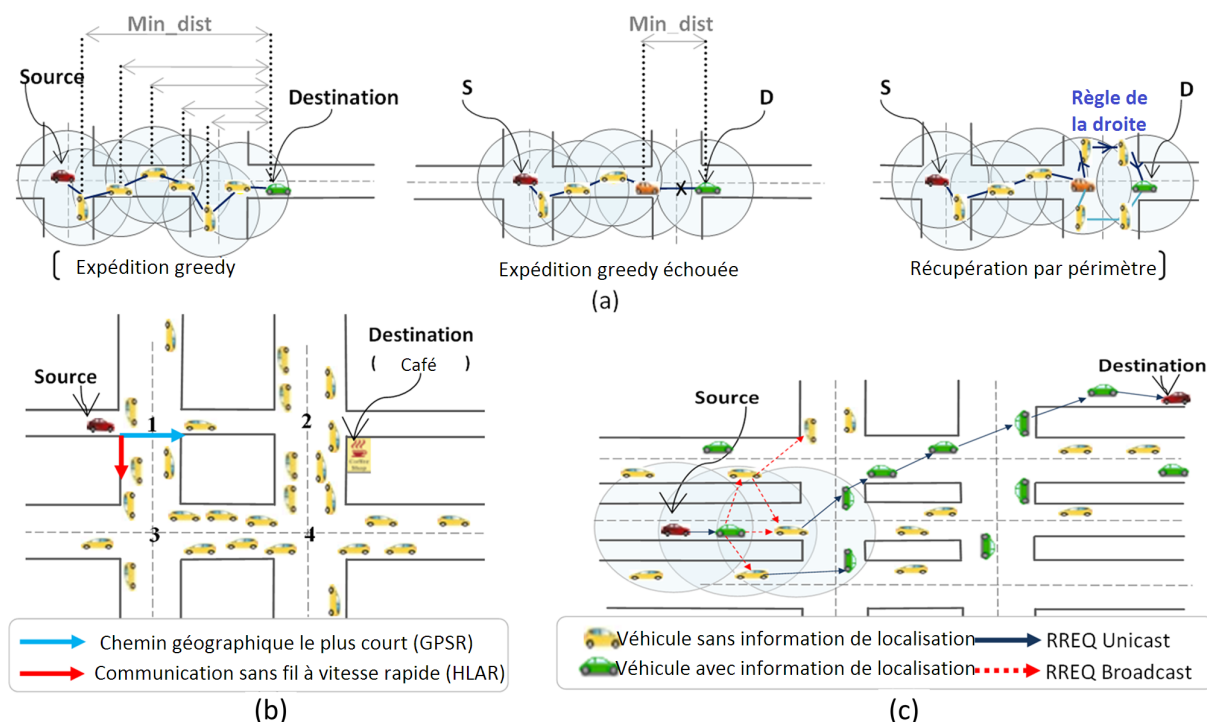


FIGURE 2.5 – (a) GPSR : démarches *greedy* et récupération par périmètre, (b) VADD : Problème clé basé sur le plus petit délai de livraison des paquets (c) HLAR : Façon de transférer RREQ de la source vers destination

Grâce au dispositif GPS, le noeud ou le véhicule a une connaissance au préalable des positionnements de la destination du paquet et du prochain saut voisin. Ces positions sont données par l'intermédiaire des messages de balise HELLO périodiquement envoyés. Par

conséquent, le réseau est moins chargé, plus évolutif et plus adapté à un environnement hautement dynamique que VANET [47]. GPSR, VADD et HLAR sont les trois protocoles de routage envisagés respectivement pour un réseau non tolérant au retard N-DTN (*Non-Delay Tolerant Network*), un réseau tolérant au retard DTN (*Delay Tolerant Network*) et un réseau hybride. Leurs principaux avantages et limitations sont cités dans le tableau 2.5.

### 2.2.2.1 Protocoles de routage non tolérants au retard (N-DTN)

Les protocoles de routage géographique non DTN visent à transmettre les données à la destination dès que possible. L'idée basique de l'approche *greedy* est d'avancer le paquet vers le voisin le plus proche de la destination. Cependant, la stratégie d'acheminement pourrait échouer si le transitaire lui-même est le plus proche. Les protocoles de routage dans ce groupe ont leur approche de récupération individuelle pour surmonter cette défaillance. Ils sont classés en trois sous classes : ceux qui adoptent le concept de balisage, ceux qui ne l'adoptent pas et ceux qui sont hybrides. Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur le protocole de routage GPSR comme exemple d'approche de balisage [70].

#### a) Routage *greedy* (GPSR)

A l'origine, GPSR a été créé pour les réseaux MANET mais qui a rapidement été adapté aux réseaux VANET [62]. GPSR implémente deux méthodes pour transférer les paquets : le renvoi gourmand (*greedy*) et le renvoi par périmètre. En fait, comme le montre la figure 2.5 (a), chaque noeud diffuse périodiquement un paquet de balise HELLO à ses voisins directs pour remplir et conserver sa liste de voisins ainsi que l'information dans la table de routage. Tout d'abord, chaque fois qu'un noeud doit envoyer un paquet, il utilise une stratégie de routage gourmande pour trouver le meilleur voisin dont la distance est la plus minimale par rapport à la destination. Avec cette décision de routage, un paquet peut être livré à la destination par le chemin optimal en termes de distance. Cependant, parfois le noeud qui envoie le paquet est lui-même le plus proche de la destination, et si la destination finale n'est pas accessible en un seul saut, la stratégie d'expédition gourmande est alors impossible. Pour résoudre ce problème, l'algorithme se rétablit par un routage autour du périmètre de la région jusqu'à l'apparition d'un voisin plus près de la destination. En ce moment, la transmission gourmande prend le relais.

### 2.2.2.2 Protocoles de routage tolérants au retard DTN

Dans un contexte purement ad-hoc, les protocoles de routage traditionnels souffrent de l'absence de connexion de bout en bout, des retransmissions excessives et des retards considérables. À partir des études et des analyses intensives réalisées par les chercheurs, il a été constaté que ces problèmes sont mieux résolus en utilisant des protocoles de routage qui tolèrent le retard. En fait, tous les noeuds s'entraident pour transférer les paquets ; ils sont conçus pour stocker et transmettre des messages via une série de retransmetteurs afin de maintenir la connectivité du réseau. VADD est présenté dans ce qui suit en tant que modèle typique de cette catégorie de protocole.

a) *Protocole de livraison de données assistée par un véhicule (VADD)*

VADD, qui est interprété dans la figure 2.5 (b), a été proposé par les auteurs de [64, 71]. Il adopte le mécanisme de *store and forward*. En fait, lors du déplacement d'un noeud, ce dernier sauvegarde le paquet jusqu'à ce qu'un nouveau noeud arrive dans sa zone pour le lui transmettre. L'objectif est de sélectionner un itinéraire d'acheminement avec le plus petit retard de livraison. À cette fin, les principes suivants doivent être respectés : le protocole VADD transmet, autant que possible, les paquets à travers des canaux sans fil. Si le paquet doit être transporté à travers des routes, celle avec une vitesse élevée est choisie en premier lieu. Puisque VANET est une zone de mobilité exaltante, la découverte de nouveaux chemins se fait d'une manière assez fréquente.

Pour transférer un paquet, VADD implémente quatre schémas différents. La première stratégie s'appelle L-VADD (*Location First Probe*) qui fournit le paquet au noeud dont la distance est la plus proche de la destination sans tenir compte de la direction du mouvement. La seconde est définie par D-VADD (*Direction First Probe*), où la sélection du prochain saut est basée sur la direction ; le prochain saut est le noeud avec la même direction que la destination. Par ailleurs, MD-VADD (*Multi-Path Direction First VADD*) fournit un multi-chemin plutôt qu'un simple chemin. La quatrième stratégie est une stratégie hybride H-VADD. Ce dernier prend les avantages de L-VADD et D-VADD pour délivrer les paquets. En outre, MD-VADD utilise initialement le L-VADD et passe à D-VADD lorsqu'il y a une détection de boucle d'itinéraire. En conséquence, cette stratégie hybride atteint des performances précises que les stratégies L-VADD et D-VADD.

### 2.2.2.3 Protocoles de routage hybrides

En raison de la déconnexion fréquente dans les réseaux ad-hoc, les modes gourmands (*greedy*) et de récupération sont inadéquats dans VANET. Par conséquent, la stratégie de routage non DTN est fusionnée avec la stratégie de routage DTN pour se remettre de ce problème. Le protocole HLAR est décrit dans cette partie comme un exemple.

a) *Routage ad-hoc basé sur l'emplacement hybride (HLAR)*

HLAR est l'un des protocoles de routage hybrides les plus connus. Il combine l'AODV modifié, défini comme protocole AODV + ETX, avec un protocole de routage codé gourmand pour trouver la meilleure route de qualité [63].

En effet, le protocole HLAR fonctionne comme un protocole réactif lors du processus de découverte d'itinéraire. Cependant, si l'itinéraire vers le noeud de destination n'existe pas, le noeud source ajoute des informations sur son emplacement et l'emplacement de la destination dans le paquet de demande d'itinéraire, puis il recherche un noeud plus proche à proximité de la destination. Si le noeud arrive à trouver le voisin élu, il transmet le paquet de demande à ce dernier. Mais si aucun voisin proche n'est trouvé, il diffuse le paquet de demande d'itinéraire à tous ses voisins. Le noeud source répète ces étapes jusqu'à ce qu'il atteigne la destination. Figure 2.5 (c) montre clairement cette description. Par ailleurs, la destination répond avec un paquet RREP dans les trois cas suivants : 1) si le paquet RREQ est le premier à être reçu de ce véhicule source, 2) si le paquet RREQ

contient un numéro de séquence source plus élevé que celui qui est dans le paquet RREQ précédemment reçu par le véhicule de destination ou 3) si le paquet RREQ contient le même numéro de séquence que celui qui se trouve dans le précédent paquet RREQ reçu par le véhicule de destination, mais le nouveau paquet indique qu'un itinéraire de meilleure qualité est disponible.

TABLE 2.5 – Protocoles VADD, GPSR and HLAR - Avantages et inconvénients

Protocoles	Avantages	Inconvénients
GPSR	Souhaitable aux autoroutes Évolutive Transmission gourmande ou <i>greedy</i>	Non performant dans le milieu urbain Non performant sans GPS
VADD	Mobilité des noeuds prédite en fonction de deux facteurs : trafic du réseau et type d'itinéraire trafic du réseau et type d'itinéraire Adaptable à la livraison de données multi sauts	Boucle de routage dans le cas de LVADD Provocation d'un grand retard en raison du changement de topologie et de trafic
HLAR	Réduction de la charge des paquets de contrôles Évolutive Nouveaux détails sur le réseau sont donnés : taille et position	Problème des régions vides Meilleur itinéraire fiable non garantie : pas de chemin inverse pour le noeud intermédiaire

En fait, tous les protocoles de routage visent à améliorer la QoS en termes de coût, de délais de transmission et de débit du réseau. Toutefois, il est encore plus difficile de trouver un protocole de routage spécifique qui fonctionne efficacement dans toutes les situations d'environnement VANET.

Le processus du routage est donc principalement le problème le plus abordé et le plus étudié dans les réseaux ad-hoc véhiculaires. Par conséquent, nous allons présenter dans la section suivante les travaux de recherche tirés de la littérature et qui ciblent des études analytiques et expérimentales sur des protocoles de routage dans ce domaine.

### 2.3 Travaux comparatifs antérieurs

Dans le récent proche, l'intérêt de la recherche en routage a été orienté notamment vers la précision, la rapidité, le coût et la fiabilité par rapport à un flux de données simple tel que CBR (*Constant Bit Rate*). Mais ce n'est que récemment, que quelques attentions ont été versées à des questions sur la perception des utilisateurs. En effet, la distribution du contenu multimédia en temps réel dans VANET devient une réalité et permet aux utilisateurs d'avoir de nouvelles expériences avec des vidéos dans une ville intelligente [72].

Dans un réseau véhiculaire ad-hoc, la variation importante de la densité des voitures entraîne de nombreux problèmes de communication. Par conséquent, différents protocoles de routage sont implémentés avec divers objectifs de conception. Dans cette section, nous présentons les travaux réalisés par les chercheurs et liés à l'évaluation de la performance de différents protocoles de routage vis-à-vis du flux multimédia et des applications en temps réel.

Les auteurs des travaux [19, 20, 21] ont étudié l'impact des protocoles de routage DSDV, AODV, GPSR, LAR et DREAM sur la QoS pour diverses conditions du réseau. Plus précisément, les chercheurs dans [19, 21] ont créé deux scénarios différents pour tester les performances de la transmission de données multimédia sous différents protocoles de routage. À partir de l'analyse des résultats, GPSR est plus adapté que AODV pour la transmission vidéo sur VANET, alors que DSDV n'est pas du tout conseillé de l'utiliser dans ce contexte. En effet, DSDV connaît des difficultés considérables pour maintenir des itinéraires valides, donc il engendre facilement des pertes de nombreux paquets. Certainement, avec une mobilité croissante, il s'efforce de maintenir continuellement les routes vers chaque noeud, ce qui entraîne une augmentation de la charge du réseau. En outre, les itinéraires en évolution rapide à travers les véhicules rapides ajoutent rapidement le trafic entre groupes. Ainsi, un protocole tel DSDV ne peut pas bien s'adapter à ces changements d'itinéraires rapides. En ce qui concerne AODV, il y a une inondation incontrôlée qui génère des transmissions redondantes, ce qui peut provoquer un problème d'extra diffusion et une surcharge dans le réseau. Selon eux, GPSR reste le meilleur choix pour un environnement VANET. Les auteurs du papier [20] ont analysé, dans des scénarios urbains et auto-routiers, les protocoles de routage DREAM et LAR en tenant compte de plusieurs métriques telles que le taux de paquets délivrés PDR, le rapport de paquets perdu, le débit, le délai de bout en bout et la charge du routage. Ils ont conclu que LAR génère de bons résultats par rapport à DREAM pour la plupart des indicateurs.

Par ailleurs, dans [73], les chercheurs se sont concentrés sur l'étude de la QoS et de la QoE avec différentes approches : Best-effort, le service différencié (DiffServ) et le QoS/QoE Adaptive Video Control (2QAV). Malheureusement, ils n'ont pas pris en compte les protocoles de routage dans leurs discussions.

Une autre étude intéressante a été réalisée par les auteurs de [22]. Ces derniers ont étudié les principales approches visant à une solution efficace pour la diffusion vidéo sur le réseau ad-hoc de véhicules. Leur travail décrit en détail le processus de diffusion vidéo et présente une évaluation des solutions existantes. Cependant, ils n'ont pas abordé les résultats de la QoE sur le papier, ce qui pouvait ajouter plus de valeur au travail.

Les chercheurs de [74] ont également abordé le problème du flux vidéo en temps réel. Ils ont proposé une solution qui applique le saut de trame et le transcodage avec des techniques de réduction de cadence. Les auteurs démontrent expérimentalement la faisabilité de leur approche en utilisant le standard IEEE 802.11.

En outre, dans [75], les auteurs ont mis en place deux systèmes de transmission de données - le renvoi par l'expéditeur dans l'autoroute (SBF-H) et le renvoi par le destinataire dans l'autoroute (RBF-H). L'objectif est de choisir le meilleur transitaire de paquets dans des voies multiples et bidirectionnelles. Les résultats ont montré que le RBF-H peut produire une meilleure qualité vidéo que le SBF-H dans la plupart des situations de circu-

lation. Cela signifie qu'un système de transmission basé sur le récepteur est plus adapté à la transmission vidéo inter-véhicules. Les auteurs ont également étudié la perte de paquets causée par le débordement de la mémoire tampon. Les résultats ont montré que la taille du tampon croissante ne peut pas toujours améliorer la qualité de la vidéo transmise. Cependant, ils ont utilisé un scénario d'autoroute puisqu'ils ont considéré que la densité du réseau dans un tel environnement est plus adaptée pour supporter une transmission continue de la vidéo. À notre avis, nous pensons qu'il n'est pas intéressant d'évaluer les performances dans une autoroute, car, dans un milieu urbain nous nous confrontons à plus de complications et. Ainsi, il est possible d'avoir un ensemble de problèmes à améliorer.

Dans les sections qui suivent, nous allons mener une étude comparative plus élargie sur une topologie urbaine. L'environnement de simulation sera détaillé juste avant cette étude.

## 2.4 Environnement de simulation

Dans tout environnement de simulation, il existe deux types de paramètres à contrôler ; un ensemble de paramètres constant et un autre ensemble de paramètres variables. Ce dernier n'est autre que les paramètres permettant la prise de mesure nécessaire à la réalisation des tests de performance du protocole simulé. Ainsi, cela nous permettra de définir, par exemple le degré de mobilité des noeuds, la charge des demandes, et le nombre des voisins connus par la connectivité.

Dans cette section, nous présentons tout d'abord les métriques utilisées pour toutes nos simulations. Ensuite, nous introduisons les outils que nous avons adopté pour implémenter tous nos simulations, notamment, le simulateur de réseau NS-2, le simulateur de mobilité VanetMobiSim ainsi que le générateur de trafic vidéo Evalvid. En fin de section, nous présentons les principaux paramètres de simulations liés à cette étude comparative.

### 2.4.1 Critères d'évaluation des performances

Les critères de performances pris en compte pour l'évaluation se penchent sur deux volets : ceux de la QoS et ceux de la QoE. En effet, les métriques de QoS rassemblent le taux de paquets délivrés (PDR), le débit du flux de trafic, le délai de bout en bout et la surcharge du réseau. Cependant, la QoE englobe le taux de bruit de signalisation PSNR (*Pick Signal Noise Ratio*), la métrique de qualité vidéo VQM (*Video Quality Metric*) et l'index de similarité structurelle SSIM (*Structural Similarity Index*).

#### 2.4.1.1 Qualité de service (QoS)

Dans un réseau VANET, la plupart des protocoles de routage proposés appartiennent à la catégorie Best-effort ou DiffServ [76]. Pour évaluer le degré de satisfaction des services, certaines mesures de QoS peuvent être utilisées telles que le délai de bout en bout, le débit, le coût du routage et le taux de livraison de paquets. Une définition de chaque mesure est présentée ci-dessous :

**PDR** : est le rapport entre le nombre de paquets de données reçus et ceux envoyés par les sources (equation 2.1). Grâce à cette métrique, il est possible de révéler l'efficacité

et la fiabilité d'un protocole en termes de garanties de livraison des paquets. Le PDR est influencé par une variété de raisons qui peuvent entraîner sa chute, à savoir, les noeuds cachés, les collisions, le signal à faible puissance, etc.

$$PDR = \frac{\sum PaquetsRecus}{\sum PaquetsEnvoyes} \quad (2.1)$$

**Délai de bout en bout - Latence :** est le temps écoulé depuis le moment où le paquet est envoyé par la source jusqu'à ce qu'il soit reçu par la destination (equation 2.2). C'est une mesure très importante, car, la plupart des applications VANET nécessitent une communication rapide. Cette exigence dépend de l'application, et parfois du type de messages envoyés. Principalement, il existe deux sources qui causent une latence élevée. La première cause est le délai d'accès au support qui dépend fortement de la densité du réseau. Ce problème peut être contrôlé dans le cas des méthodes d'accès déterministes. La seconde provient du temps de traitement des paquets dans les noeuds intermédiaires, en particulier, dans les files d'attente. En outre, la délai de bout en bout dépend de la charge de trafic et des mécanismes de gestion des files d'attente.

$$Delai = \frac{\sum_{i=0}^n TempsPaquetRecu_i - TempsPaquetEnvoye_i}{Totaldespaquetsrecus} \quad (2.2)$$

**Débit (*Throughput*) :** est la quantité de transmission de données réussies d'un noeud à l'autre dans une période de temps donnée (equation 2.3). Le débit joue un rôle primordiale dans le choix d'un protocole de routage pour les réseaux mobiles. Il est généralement mesuré en bits par seconde (bps), méga-bits par seconde (Mbps) ou giga-bits par seconde (Gbps). Étant donné que la largeur de la bande passante définit la capacité de la couche physique en termes de quantité de données pouvant être transmises par unité de temps, le débit, lui, il définit la quantité d'informations qui occupe la bande passante. En fait, la bande passante correspond au débit maximal. Ce dernier peut être affecté par plusieurs facteurs tels que la densité des noeuds, la fiabilité du support de transmission sans fil et les caractéristiques du protocole utilisé pour la gestion de l'accès au support (MAC).

$$Debit = \frac{TaillePaquetsRecus}{TempsReception - TempsEnvoi} \quad (2.3)$$

**Surcharge :** est le rapport entre le nombre total d'octets des messages de contrôle et le total des données reçues en plus des paquets de contrôle (equation 2.4). Cette métrique s'avère être aussi importante puisqu'elle répercute l'efficacité des protocoles de routage. Notamment, un protocole de routage efficace ne doit pas surcharger le réseau, et donc il est nécessaire de marquer cette mesure lors des évaluations.

$$Surcharge = \frac{\sum MsgContrôle}{\sum QuantiteDonneesRecues + MsgContrôle} \quad (2.4)$$

### 2.4.1.2 Qualité de l'expérience (QoE)

En raison de la disponibilité des informations à grande échelle, les modèles d'étude de QoE dirigés par l'information sont apparus récemment avec la demande croissante de transmission vidéo dans les réseaux VANET [77]. Les auteurs de [78] donnent un sondage complet sur l'évolution des approches d'estimation de la qualité vidéo, l'analyse des caractéristiques, des avantages et des inconvénients. Sur la base de la QoE, ils présentent également des applications vidéo avec des perspectives d'avenir.

La perception des vidéos liée à la QoE est mesurée clairement par l'opinion des utilisateurs et diffère largement du principe de QoS [79]. Dans ce contexte, les métriques de QoS ne parviennent pas à saisir des aspects subjectifs du contenu vidéo liés au système visuel humain comme il est censé être pour les environnements axés sur l'homme. Par conséquent, les paramètres objectifs et subjectifs de la QoE, tels que SSIM, PSNR, VQM et le score moyen d'opinion MOS (*Mean Opinion Score*) doivent être utilisés pour mesurer le niveau de qualité vidéo par rapport au point de vue de l'utilisateur [80]. Nous mentionnons ci-après, la description des équations mathématiques de chacune de ces mesures de QoE :

**PSNR** : Compare image (*frame*) par image la qualité de la vidéo reçue avec celle de l'original. L'image reçu dont la ressemblance est frappante entraînera des valeurs plus élevées.

$$PSNR = 10 \cdot \text{Log}_{10} \frac{MaxErr^2 \cdot w \cdot h}{\sum_{i=0, j=0}^{w, h} (x_{ij} - y_{ij})^2} \quad (2.5)$$

avec :

*MaxErr* est la valeur absolue maximale possible de la différence de composants de couleur, *w* illustre la largeur de la vidéo, *h* la hauteur de la vidéo, tandis que  $x_{ij}$  et  $y_{ij}$  sont respectivement la source et les séquences vidéos traitées.

**VQM** : Mesure les dégâts de perception de la vidéo expérimentés en fonction des caractéristiques du système visuel humain incluant, en un seul facteur, des métriques tels que le flou, le bruit, la distorsion des couleurs et les blocs de distorsion. Notons que plus la mesure est proche de 0, meilleure est la qualité de la vidéo.

**SSIM** : Utilise la dépendance structurelle dans la vidéo pour estimer la distorsion perçue [81]. Il donne un meilleur résultat que le PSNR car celui-ci ne modélise pas avec précision la qualité perceptive. Dans [82], des équations mathématiques de la métrique SSIM sont détaillées. En fait, les auteurs ont développé le SSIM et ont démontré son utilité prometteuse à travers un ensemble d'exemples intuitifs.

$$SSIM(x, y) = SSIM(y, x) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (2.6)$$

avec :

$x$  et  $y$  sont deux fenêtres de taille commune.  $\mu_x$  et  $\mu_y$  sont respectivement la moyenne de  $x$  et de  $y$ , tandis que  $\sigma_x^2$  et  $\sigma_y^2$  représentent respectivement la variance de  $x$  et de  $y$ . La

covariance des deux fenêtres est exprimée par  $\sigma_{xy}$ . Finalement,  $c_1$  et  $c_2$  sont deux variables pour stabiliser la division avec un dénominateur faible.

Ces trois mesures objectives, i.e. PSNR, VQM et SSIM nécessaires pour évaluer la qualité de la vidéo, visent à quantifier la visibilité des différences entre une vidéo déformée et une vidéo source. Ils sont obtenus à l'aide de l'outil de mesure vidéo *MSU* [83].

**MOS** : Est la mesure subjective la plus traditionnelle [84]. Dans notre étude, la valeur MOS est estimée en fonction des mesures quantitatives : PSNR, SSIM et VQM. Comme la plus part des chercheurs, nous évaluons le niveau de qualité MOS sur une échelle de 1 à 5 comme le décrit le tableau 2.6.

TABLE 2.6 – Décisions pour tracer le MOS

PSNR (dB)	VQM	SSIM	MOS
> 20	< 3	1	5 (Excellent)
14-20	3-6	0.7-0.9	4 (Bien)
12-14	6-10	0.5-0.7	3 (acceptable)
10-12	10-14	0.3-0.5	2 (Faible)
<10	> 14	< 0.3	1 (Mauvais)

## 2.4.2 Vue d'ensemble sur les simulateurs exploités

### 2.4.2.1 Simulateur de réseau NS-2

La simulation permet de tester, à moindre coût, les nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes qui peuvent se poser afin d'implémenter la technologie la mieux adaptée aux besoins. Toutes nos simulations sont réalisées à l'aide du simulateur NS-2. Donc, avant d'entamer la discussion sur les paramètres de simulation et la simulation elle-même, nous introduisons tout d'abord certaines fonctionnalités du simulateur telles que la prise en charge des réseaux sans fil ou câblés, l'adaptation aux réseaux ad-hoc, et enfin les différentes composantes avec lesquelles il interagit.

NS est un simulateur réseau orienté objet à événements discrets [85]. Il permet à l'utilisateur de définir un réseau et de simuler des communications entre les noeuds de ce réseau. Le projet NS a vu le jour en 1989 comme étant une version qui reflète beaucoup mieux la réalité. Comme beaucoup de projets open source, il a évolué de façon substantielle au cours des dernières années grâce à la contribution des utilisateurs et des programmeurs. Ce qui caractérise principalement NS-2 des autres simulateurs, notamment OPNET [86] et Qualnet [87], c'est son côté open source et gratuit. En outre, il est soutenu par de grands acteurs dans les recherches scientifiques, à savoir DARPA, Sun et Xerox et UCB [88]. L'auteur de [88] a rassemblé et étudié plusieurs outils de simulation en comparant les points forts et les points faibles de chacun d'eux.

NS-2 utilise le langage C++ et le langage *OTCL* (*Object Tools Command Language*), dérivé objet de *TCL*. La question qui se pose c'est pourquoi deux langages ?

Tout simplement parce-que le simulateur NS-2 fonctionne suivant deux raisonnements différents :

▷ D'une part, la manipulation des bits et des entêtes de paquet, qui permet d'implémenter des algorithmes capables de parcourir plusieurs types de données. Par conséquent, aboutir à une création rapide et efficace des objets et variables manipulés lors de la simulation. De ce fait, une rapidité d'exécution est requise par rapport à la découverte des erreurs, la correction, la re-compilation et la ré-exécution qui est moins importante. Tout ceci est réalisé grâce au langage C++.

▷ D'autre part, la configuration des objets, la gestion des évènements et l'exploration d'un grand nombre de scénarios sont offertes par le langage *OTCL*, qui permet d'une manière interactive le changement du modèle et son ré-exécution, avec un temps d'itération plus important par rapport à la rapidité d'exécution. Notons aussi que le *TCLCL* permet aux objets et variables d'apparaître et d'être utilisés par les deux langages [89].

Toutefois, *OTCL* et C++ partagent une même hiérarchie des composants. La librairie *TclClass* assure le lien entre les classes *OTCL* et C++; partage de fonctions, de variables,...etc (voir la figure 2.6).

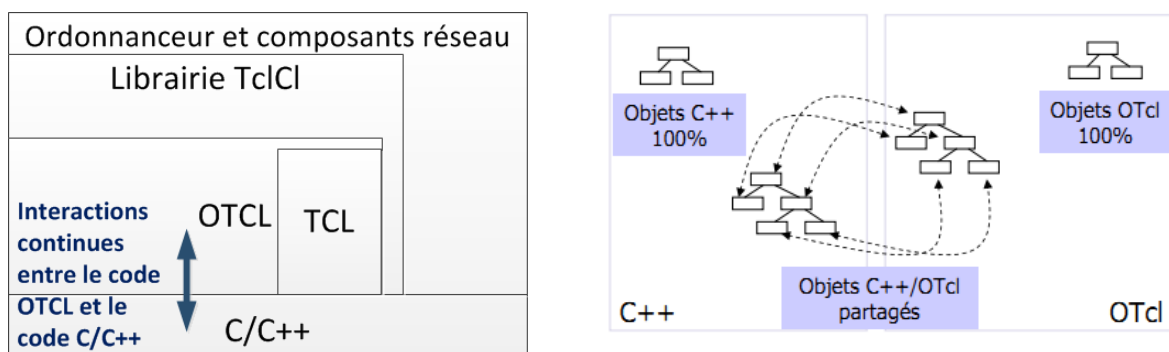


FIGURE 2.6 – Couches NS-2 et dualité OTCL/C++

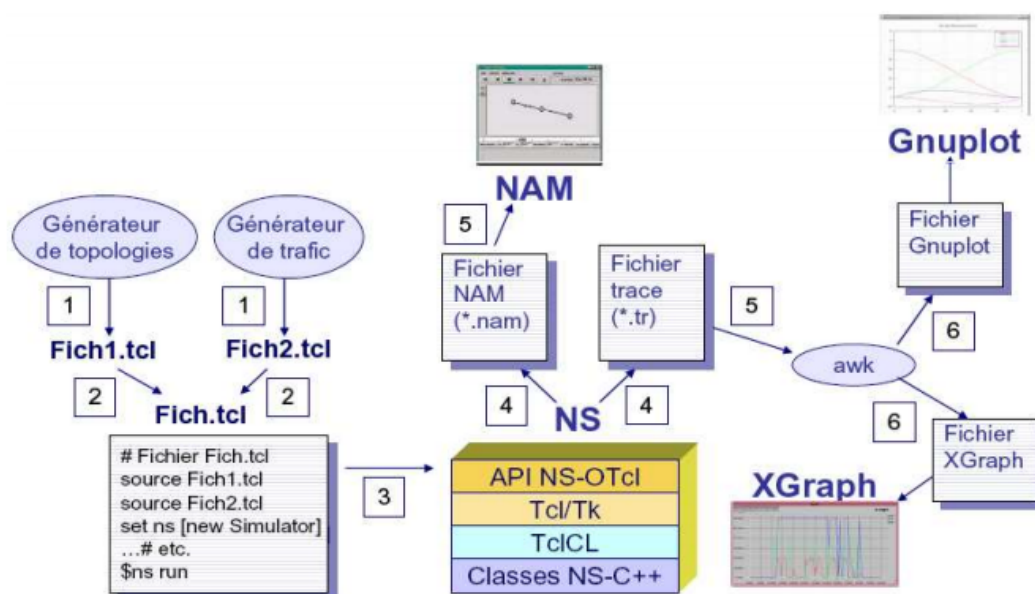


FIGURE 2.7 – Interaction de NS-2 avec d'autres outils

Par ailleurs, NS-2 interagit avec différents outils notamment les générateurs de trafic et de topologies, les outils d'analyse des traces et de visualisation de la simulation (voir figure 2.7). La simulation doit d'abord être saisie sous forme de fichier texte que NS-2 utilise pour produire un fichier trace contenant les résultats. NS est fourni avec différents utilitaires dont des générateurs aléatoires et un programme de visualisation nommé NAM (*Network AniMator*).

Les principaux composants actuellement disponibles dans NS-2 sont représentés par catégorie comme suit :

- ▷ Application Web, ftp, telnet, générateur de trafic (CBR, ...);
- ▷ Transport TCP, UDP, RTP, SRM;
- ▷ Routage statique ou dynamique (vecteur de distance);
- ▷ Routage Multicast (DVMRP, PIM);
- ▷ Gestion de file d'attente : RED, DropTail, Token bucket, etc;
- ▷ Discipline de service : CBQ, SFQ, DRR, Fair Queueing;
- ▷ Système de transmission : CSMA/CD, CSMA/CA, lien point à point.

Le simulateur NS regroupe également différents modèles, à savoir, les modèles de réseaux, les modèles de propagations et les modèles de mobilité :

### ***Modèle de réseau sous NS-2***

Un modèle de réseau [90] sous NS-2 est constitué de :

- ▷ Noeuds de réseau ou noeuds de routage : endroits où est généré le trafic;
- ▷ Liens de communication entre les réseaux;
- ▷ Agents de communication, représentant les protocoles de niveau transport (TCP, UDP);  
Ces agents sont attachés aux noeuds et connectés l'un à l'autre, ce qui représente un échange de données (connexion TCP, flux UDP);
- ▷ Applications qui génèrent le trafic de données selon certaines lois (CBR, VBR). Elles se servent des agents de transport.

### ***Modèles de propagation sous NS-2***

NS-2 permet de choisir parmi les modèles de propagation suivants, qui vont influencer en particulier sur la manière dont seront atténués les signaux en fonction de la distance [90] :

#### *a) Le modèle de propagation en espace libre (Free space model)*

Ce modèle prend le cas idéal où on trouve une seule direction de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Pour calculer la puissance du signal reçu en environnement libre à une distance  $d$  de l'émetteur, l'équation suivante est alors utilisée :

$$Pr(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi^2) d^2 L}$$

- Où
- ↔  $P_t$  est la puissance d'émission,
  - ↔  $G_t$  et  $G_r$  sont respectivement les gains des antennes de l'émetteur et du récepteur.
  - ↔  $L$  (avec  $L \geq 1$ ) est la perte du système,
  - ↔ et  $\lambda$  la longueur d'onde.

Si un récepteur est en dehors de ce cercle il ne reçoit aucun paquet, sinon il les reçoit tous.

*b) Le modèle de propagation utilisant deux rayons (Two-ray ground reflection model)*

Le modèle two-ray ground considère à la fois le chemin direct et une réflexion sur le sol. Ce modèle donne des résultats plus justes que le modèle de propagation en espace libre quand la distance est assez grande. La puissance reçue à une distance  $d$  est calculée comme suit :

$$Pr(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{(d^4)L}$$

Où

$\hookrightarrow h_t$  et  $h_r$  sont les hauteurs des antennes de transmission et de réception.

$\hookrightarrow L$  a été ajouté pour que NS soit cohérent avec le modèle de propagation en espace libre.

Cette équation présente une décroissance, plus rapide que l'équation précédente, de la puissance reçue en fonction de la distance. Cela dit, le modèle à deux rayons ne donne pas de bons résultats pour les distances courtes, ce qui rend le modèle de propagation en espace libre favorable dans ce cas.

*c) Le modèle Shadowing*

Le Shadowing n'impose pas l'existence d'un chemin direct entre l'émetteur et le récepteur. Il modélise les déviations subites par le signal lors de sa propagation. En approuvant ce modèle, nous tenons en compte des phénomènes imprévisibles que peut subir le signal. La puissance reçue varie en fonction du logarithme de la distance.

### **Modèles de mobilité sous NS-2**

Dans les chapitres qui ont précédés, nous avons incessamment insisté sur le changement dynamique et aléatoire de la topologie des réseaux ad-hoc. Les noeuds mobiles peuvent être en mouvement constant comme ils peuvent être immobiles. Pour cela, dans l'environnement de simulation NS-2, nous retrouvons plusieurs types de modèles de simulation grâce aux quels nous pourrions mesurer le facteur de mobilité [90], à savoir :

*a) Random Waypoint Model (RWM)*

Ce modèle, contrairement aux autres modèles, est souvent utilisé dans l'analyse des performances des protocoles de routages ad-hoc, vu que la mobilité des noeuds est typiquement aléatoire. En effet, la destination et la vitesse de chaque noeud mobile, désirant se déplacer, est aléatoire, et est limité à un intervalle bien déterminé. Après son déplacement, le noeud mobile s'immobilise pour un temps fini, puis se déplace à nouveau de la même manière que la première fois, et cela jusqu'à la fin de la simulation.

*b) Random Direction Model (RDM)*

De la même façon que le modèle précédant (RWM), la destination ainsi que la vitesse du noeud sont choisies aléatoirement. Mais dans le modèle RDM, le noeud en déplacement doit atteindre les bornes de la surface de simulation, puis s'immobilise. Une fois le noeud immobile, et dans un intervalle de  $180^\circ$  par rapport à la position d'arrêt (borne atteinte), le noeud mobile peut entreprendre à nouveau son mouvement aléatoire.

### c) *Modified Random Direction Model (MRDM)*

Cette version modifiée du RDM permet aux noeuds mobiles de ne pas forcément atteindre les bornes de la surface de simulation. Notons que le modèle RWM reflète bien les caractéristiques des réseaux ad-hoc, car il offre une mobilité aléatoire aux noeuds mobiles appartenant au réseau ad-hoc, contrairement aux modèles RDM et MRDM qui, d'une manière indirecte, conditionnent le mouvement des noeuds.

### **Modèles de mobilité dédiés aux réseaux VANET**

Le modèle de mobilité est un composant très important. En effet, sa complicité auprès du modèle de réseau sans fil pourrait produire des résultats plus significatifs. Le modèle RWP est le plus utilisé lorsqu'on parle de MANET. Par contre, avec VANET, il existe de différents nombres de logiciels open source et commerciaux pour générer le mouvement des véhicules sur une topologie prédéfinie.

Pour assurer l'interaction entre le module de mobilité et celui du réseau, il existe deux approches différentes. La première consiste à mettre en oeuvre le modèle de mobilité à partir du zéro. Dans cette situation, l'intégration entre le modèle de mobilité et le modèle de communication réseau est assurée implicitement dans la phase de conception. Il existe plusieurs exemples de cette approche comme GrooveSim [91], TraNS [92] et ASH [93]. L'autre approche consiste à utiliser une implémentation de modèle de mobilité existante et de l'intégrer à un simulateur de réseau. Le défi de cette approche est de réaliser une intégration en ligne, dans laquelle le mouvement des véhicules est directement influencé par les applications VANET.

La façon la plus facile et la plus utilisée est de générer des modèles de mobilité hors ligne, puis d'utiliser ces résultats comme entrée d'un simulateur de réseau. De nombreux modèles de mobilité, ont été publiés récemment notamment, SUMO [94], Citymob [95], VanetMobiSim [96], GlomoSim [97], STRAW [98], SWANS [99], etc.

Notre choix s'est porté sur le générateur VanetMobiSim en raison de sa notoriété reconnue auprès de la recherche scientifique. Il est l'unique générateur qui fournit un excellent support de trace. VanetMobiSim a des composants de visualisation du mouvement des noeuds (voir la figure 2.8 de la sous-section suivante 2.4.2.2).

#### 2.4.2.2 *Simulateur de mobilité VanetMobiSim*

Le choix des outils de mise en oeuvre s'est montré délicat compte tenu du simulateur de réseau et du générateur de mobilité. Nous utilisons VanetMobiSim qui se concentre sur la mobilité des véhicules et offre de nouveaux modèles de mouvement réaliste au niveau macroscopique et microscopique. En fait, VanetMobiSim comprend plusieurs modèles de mobilité qui sont : le modèle de pilote intelligent IDM (*Intelligent Driver Model*), le modèle de pilote intelligent avec changements de voie IDM-LC (*Intelligent Driver Model with Lane Changes*), le modèle de pilote intelligent avec gestion d'intersection IDM-IM (*Intelligent Driver Model with Intersection Management*) et le modèle de trafic fluide FTM (*Fluid Traffic Model*). Afin d'évaluer l'impact de ces modèles de mobilité, de nombreux travaux ont été résumés dans le papier [100], confirmant que chacun de ces modèles est adapté à certaines circonstances spécifiques et à un protocole spécifique.

FTM et IDM utilisent des voies simples pour décrire la mobilité des voitures sans

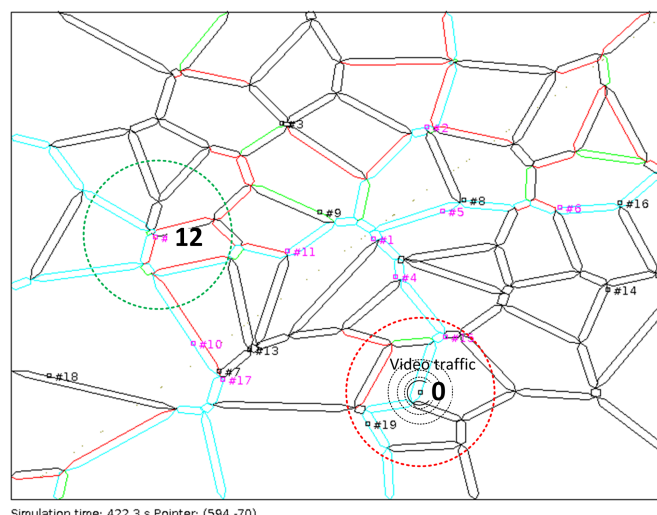


FIGURE 2.8 – Topologie aléatoire utilisée pour nos simulations

tenir compte des flux qui interagiront entre les véhicules en cas d’une telle intersection. Selon les auteurs de [101], FTM ne gère pas correctement la mobilité des intersections des nœuds. En effet, il ne tient pas compte de l’accélération d’une bonne manière. D’autre part, nous pourrions travailler avec IDM-IM mais cela ne permet pas de changer de voie. Par la suite, IDM-LC a ses propres inconvénients mais semble être le plus pratique pour notre travail car il prend en compte les intersections, les feux de signalisation, la vitesse des véhicules, la considération du voisin, mais aussi les voies changeantes [96] (voir la figure 2.8).

### 2.4.2.3 Générateur de trafic vidéo Evalvid

Comme déjà mentionné dans le premier chapitre de ce mémoire, l’application multi-média a un potentiel élevé dans le service distrayant offert par VANET. En fait, elle est bien adaptée pour la collecte d’audit environnemental, les accidents de la route et les applications vidéo en cas de catastrophe [102]. Un flux multimédia en temps réel fournit aux utilisateurs une connaissance plus crédible que des messages texte simples. Ce type de flux permet de déterminer une action tout en réduisant les temps de réaction humains [103]. Cependant, le type de vidéo libère un fichier volumineux, de sorte qu’il est difficile de le transmettre de point en point d’un seul coup. Par conséquent, le fichier peut être corrompu si au moins un paquet est perdu. D’où l’utilité de la compression que nous avons déjà discuté lors de la section 1.3.

Notre étude comparative examine le scénario de trafic vidéo entre tous les véhicules connectés. Nous intégrons Evalvid comme générateur de vidéo. Cet outil génère le fichier source d’entrée, appelé « fichier st », à partir de l’information des images vidéo. La source vidéo utilisée dans la simulation est *Foreman.yuv* qui contient 300 images au format YUV CIF (352x288). Cette séquence vidéo est compressée par MPEG-4 codec [104] et envoyée depuis une source vers une destination à la 10ème seconde avec un taux de 30 images/s. La figure 2.9 illustre le bloc démontrant la méthodologie d’utilisation de Evalvid.

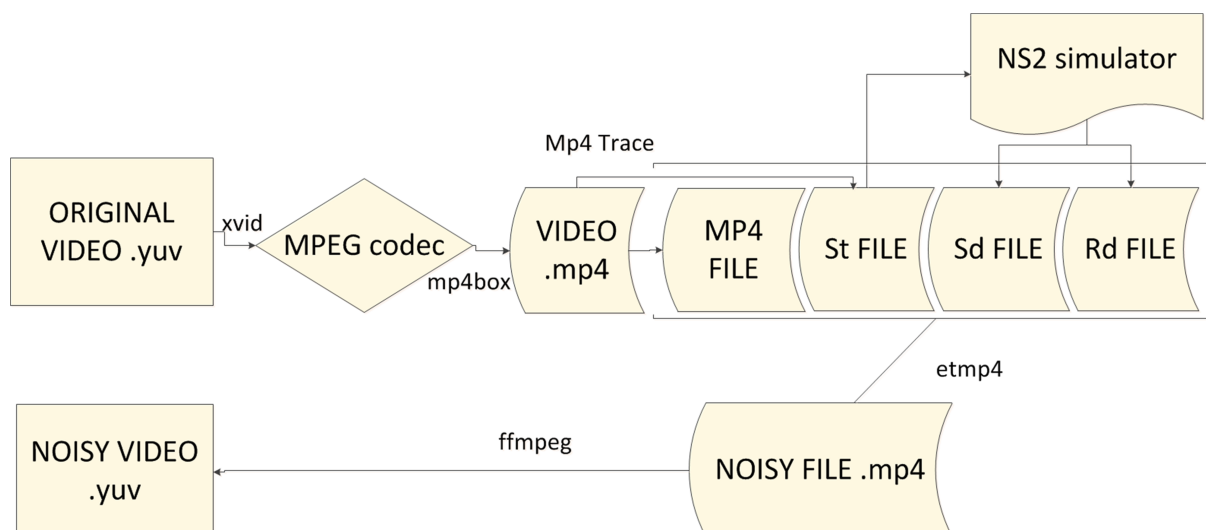


FIGURE 2.9 – Evalvid et NS-2 : bloc de méthodologie

TABLE 2.7 – Valeurs prises en compte dans la simulation

Paramètres utilisés pour les couches physiques et de liaison			
Modèle de propagation	Two Ray Ground	Paramètres utilisés pour le modèle de mobilité	
Bande passante	100Mbps		
Portée de transmission	250m		
Protocole MAC	IEEE 802.11p	Topologie	670m * 670m
Paramètres utilisés pour le modèle de trafic		Nombre de véhicules	20-30-40-50-60 70-80-90-100
Trafic d'arrière-plan	CBR/UDP	Modèle de mobilité	IDM-LC
Type de multimédia	MPEG-4	Paramètres utilisés pour le modèle IDM-LC	
Fichier vidéo réel	Foreman.yuv ayant 300 frames en format YUV CIF (352 x 288)	Intervalle de signalisation	10
Connexions CBR	5-10-15-20-25-30	Direction des véhicules	2 voies
Taille paquets CBR	512 octets	Accélération	18 to 50 (Km/h)
Taux paquets CBR	10 paquets/seconde		
Temps simulation	300 secondes		

### 2.4.3 Paramètres de simulation

Afin de comparer les dix différents protocoles de routage ad-hoc, nous avons eu recours à Evalvid connu comme générateur du fichier vidéo, au simulateur de réseau NS-2.33 et au simulateur de trafic routier VanetMobiSim. Nous avons considéré un graphe *Voronoi* qui génère la topologie d'une manière aléatoire en créant un ensemble de points non uniformément répartis (voir figure 2.8). Par conséquent, nous bénéficions de graphes aléatoires rapides et configurables. Les rues sont composées d'un nombre variable de véhicules qui

se déplacent au hasard avec des vitesses différentes allant jusqu'à 50 km/h. Les véhicules peuvent changer de voies, si nécessaire et si possible, selon le modèle IDM-LC présenté dans la sous-section ci-dessus.

Le choix du standard IEEE 802.11p repose sur le fait qu'il peut augmenter le débit du canal et réduire également le délai moyen d'accès au paquet [31]. IEEE 802.11p [105] est un amendement à la norme IEEE 802.11. Il définit les améliorations apportées au 802.11 requises pour supporter les applications des systèmes de transport intelligent, y compris l'échange de données entre les véhicules en mouvement et entre les véhicules et l'infrastructure routière dans la bande STI autorisée de 5,9 GHz [51]. Les principaux paramètres de simulation sont répertoriés dans le tableau 2.7.

## 2.5 Étude comparative par rapport au flux vidéo

Cette section est organisée de façon à comporter deux parties : l'une présente la comparaison des résultats obtenus dans le cadre de l'analyse de l'impact de la charge et de la densité sur la QoS, l'autre est consacrée à l'analyse de l'impact de la charge et de la densité sur la QoE. Les facteurs à évaluer lors des simulations sont tous déjà présentés dans la sous section 2.4.1.

Lors de nos simulations, la vidéo est envoyée depuis un noeud source vers une destination unique. Afin d'avoir du bruit dans le réseau, nous générons un trafic de fond de type CBR (*Constant Bit Rate*). Ainsi, pour analyser l'impact de la charge, le trafic CBR varie entre 5 et 30 connexions avec un intervalle de transmission d'une seconde, tandis que le nombre de véhicules est maintenu à 50. En outre, pour étudier l'efficacité des dix protocoles de routage sous différentes densités de véhicules, nous varions le nombre de véhicules entre 20 et 100 avec un pas de 10. Il convient de noter que tous les résultats, que ce soit par rapport à la charge ou à la densité, sont obtenus à partir de la moyenne de 30 simulations.

### 2.5.1 Analyse des résultats de QoS

#### 2.5.1.1 Mesure du PDR

a) *PDR : Taux de paquets délivrés en fonction de la charge du réseau*

Dans cette partie, nous étudions le taux de délivrance de paquets pour le flux vidéo. À mesure que la charge de trafic augmente, les paquets risquent de ne pas trouver leurs chemins en raison de la forte probabilité de collisions. En prenant le cas d'un scénario simple, où le noeud génère un paquet à envoyer, le protocole de routage, grâce à son mécanisme de découverte, tente de trouver un itinéraire fiable vers la destination finale. En cas d'erreur lors de la transmission, un itinéraire alternatif est découvert, sinon la couche MAC est incapable de délivrer le paquet, d'où sa perte.

A partir de la figure 2.10(a), les meilleurs résultats reviennent respectivement aux protocoles réactifs, DSR, AODV et DYMOUM en raison de leur capacité de maintenir l'itinéraire et de construire les informations de routage uniquement lorsqu'ils doivent envoyer des données. En fait, le protocole DSR offre les meilleures performances grâce à

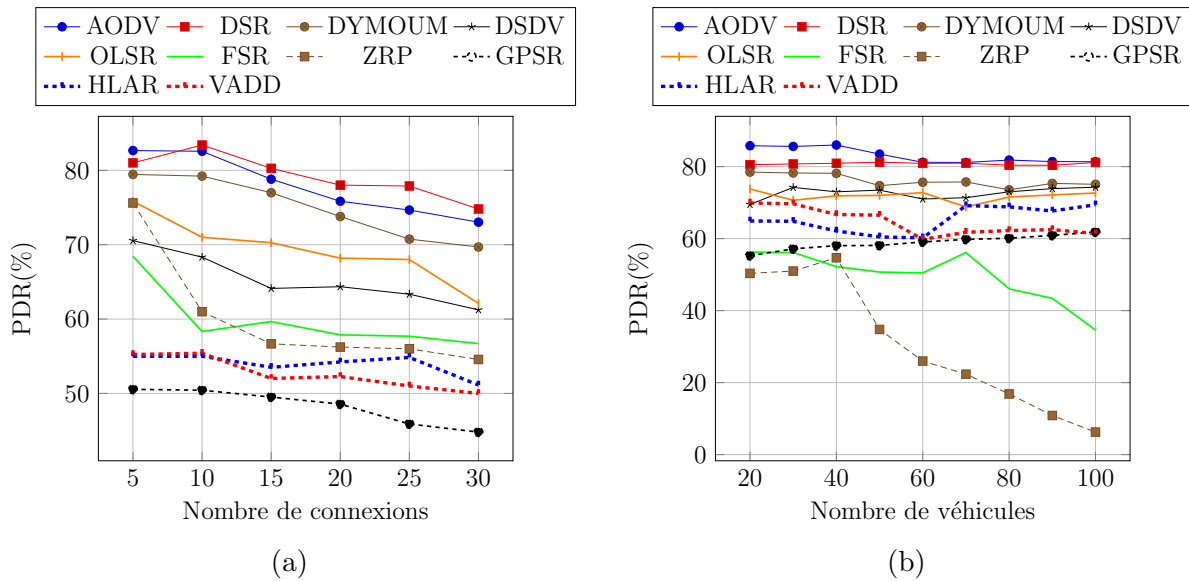


FIGURE 2.10 – PDR ; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité

la mémoire cache qu'il en bénéficie. En effet, comme mentionné dans la section 2, DSR peut stocker dans le cache plus d'un chemin vers la destination, ce qui permet d'utiliser immédiatement un itinéraire alternatif au lieu de le redécouvrir à nouveau en cas d'échec. Si le cache est vide, alors la redécouverte est indispensable.

Les protocoles pro-actifs, OLSR, DSDV et FSR, engendrent respectivement une petite dégradation des performances par rapport aux protocoles réactifs. Comme mentionné dans la section 2, les protocoles pro-actifs sont caractérisés par l'anticipation à maintenir le meilleur chemin possible et par la suite réduire la retransmission des paquets de données. Cependant, même si les routes sont disponibles à l'avance, la congestion provoquée par la diffusion des paquets RREQ peut entraîner des pertes. Le protocole OLSR est le meilleur, car il diffuse les messages de contrôle de topologie uniquement à travers les noeuds MPR, ce qui réduit relativement la surcharge et la congestion. Le protocole DSDV vient en second lieu à cause de sa stratégie de découverte qui inonde le réseau. Il a également quelques limitations, particulièrement celle du lien unidirectionnel. En ce qui concerne le protocole FSR, il connaît les plus faibles résultats en le comparant aux deux protocoles OLSR et DSDV. En effet, il révèle un déclin remarquable entre 5 et 10 connexions pour se stabiliser pratiquement après. Ceci est dû à l'imprécision du routage ; la surcharge du réseau influence et embrouille considérablement le champ de vision du mécanisme de l'œil de poisson.

Le protocole hybride ZRP marque une chute aiguë dans l'intervalle entre 5 et 10 connexions, néanmoins, son résultat reste acceptable. Par contre, le taux commence à diminuer au-delà de 10 connexions, ce qui nous laisse penser que même si le protocole ZRP combine les avantages et les inconvénients des protocoles pro-actifs et réactifs, il demeure inefficace dans une topologie VANET très dynamique et en continuelle évolution.

Par ailleurs, le PDR le plus faible revient aux protocoles de routage basés sur la position, HLAR, VADD et GPSR. En fait, le taux de délivrance peut être considérablement affaibli à cause de la précision de l'emplacement. En effet, cette précision doit être disponible en permanence et la plus à jour possible pour obtenir une bonne performance

avec le routage géographique. Le protocole HLAR donne un bon résultat comparé aux deux autres car il n'a pas besoin de configurer ou de maintenir des zones de routage ou même d'échanger des tables de routage. Le protocole VADD, lui, donne des valeurs un peu faibles puisqu'il délivre les paquets sans tenir compte de la direction des véhicules, ce qui conduit à des pertes assez importantes dans le cas de directions non similaires. Cependant, le protocole GPSR offre les résultats les plus bas en raison de son problème d'évolution. En fait, il peut augmenter la possibilité de tomber sur un maximum local ou sur des ruptures de liens avec certains noeuds voisins périmés à cause de la mobilité très élevée des véhicules et des spécificités routières dans les zones urbaines. En ajoutant aussi qu'avec un renvoi basé sur le mode périmètre du protocole GPSR, le nombre de sauts augmente ce qui peut causer aussi des pertes significatives.

*b) PDR : Taux de paquets délivrés en fonction de la densité du réseau*

la figure 2.10(b) illustre les paquets de données délivrés avec succès lors des simulations par rapport au nombre de véhicules. Tous les dix protocoles révèlent de bonnes performances pour de faibles densités. En revanche, lorsque la densité du réseau augmente, les performances diminuent.

Nous pouvons observer sur la même figure que le taux du PDR pour les protocoles réactifs, AODV, DSR et DYMOUM, est le plus élevé. Ceci est dû à leurs mécanismes de découverte et de maintenance des itinéraires. En particulier, la performance de AODV dépasse celle de DSR, tandis que ce dernier est légèrement supérieure par rapport à DYMOUM. En fait, AODV utilise des nombres de séquence vers la destination et offre ainsi une convergence rapide lorsque la topologie du réseau change, ce qui le rend le plus performant.

D'un autre côté, en utilisant les protocoles pro-actifs, DSDV, OLSR et FSR, le taux du PDR diminue en augmentant le nombre de véhicules. Ceci est dû à l'approche basée sur la table de routage (*Table Drive*) utilisée par presque tous les protocoles pro-actifs. Précisément, OLSR surpasse DSDV et FSR en raison de l'optimisation élevée des noeuds MPR qui réduisent les frais généraux et consomment une faible bande passante. En ce qui concerne DSDV, selon les auteurs de [44], il ne converge pas si les véhicules ne s'arrêtent pas pendant au moins 300 secondes pendant le mouvement. Pour notre scénario urbain où il existe différents obstacles (Exp : nombre évident de noeuds, feux rouges, stationnement, ..., etc), la probabilité que les noeuds soient suspendus durant un temps considérable est énorme et les entrées obsolètes dans le réseau sont alors évitées, ce qui mène à moins de perte. Le protocole FSR, quant à lui, donne le résultat le plus bas par rapport à OLSR et DSDV. En fait, FSR met à jour les informations des noeuds voisins plus fréquemment que pour les noeuds distants qui se situent en dehors de la portée de l'oeil de poisson. Cela le rend plus évolutif vers les grands réseaux. Cependant, cette évolution est au prix du taux de livraison réduit.

Enfin, les protocoles de routage basés sur la position, VADD, GPSR et HLAR, donnent légèrement des résultats inférieurs par rapport à ceux générés par les protocoles pro-actifs. En fait, le protocole VADD a non seulement besoin des informations de base fournies par le GPS, mais aussi des informations de trafic statistiques telles que la densité moyenne du

véhicule et l'historique du flux de trafic pour calculer le mouvement du véhicule et prendre une décision d'acheminement vers des zones dans un délai minime. Mais, dans la pratique, ces informations changent fréquemment de sorte que le résultat calculé par l'information de trafic statistique ne reflète pas toujours le chemin optimal et affectera par la suite les résultats expérimentaux. Avec le protocole HLAR, le PDR augmente car, avec une grande densité du réseau, les noeuds peuvent établir et réparer facilement les routes. En ce qui concerne GPSR, les informations exactes sur les emplacements sont un facteur essentiel pour obtenir un bon PDR. Ainsi, avec un nombre important de véhicules, l'information de position peut être facilement fondée par l'appareil GPS. Malheureusement, en raison de la topologie dynamique du réseau VANET, le prochain saut peut dépasser l'information sur la position de ses voisins. En outre, l'emplacement de la destination se trouvant dans l'en-tête du paquet ne peut jamais être mis à jour alors que le paquet est transféré de la source vers la destination, d'où la perte significative des données.

Le protocole hybride ZRP diminue les performances sensiblement dans la mesure que la taille du réseau augmente. Cette situation s'explique par le fait que ZRP fonctionne selon le rayon de la zone. En fait, lorsque le rayon de la zone est élevé, ZRP se comporte comme un protocole pro-actif pur. Par conséquent, le taux de livraison est réduit en raison de sa nature pro-active.

### 2.5.1.2 Mesure du délai de bout en bout

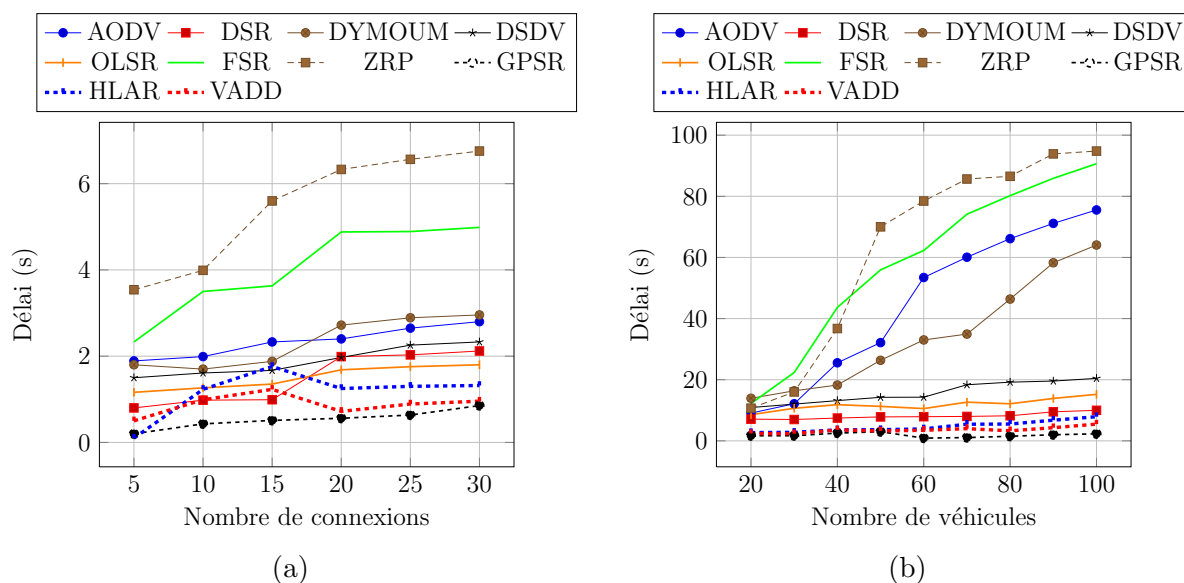


FIGURE 2.11 – Délai ; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité

#### a) Délai de bout en bout en fonction de la charge du réseau

La métrique du délai de bout en bout reflète les retards causés par la mémoire tampon pendant la découverte d'itinéraire, la congestion, les retards de transmission et la gestion de l'interface de la file d'attente. En fait, lorsque le véhicule génère un certain nombre de paquets, il ne les envoie pas tous au même temps vers la destination. En réalité, il les met dans la file d'attente, et si cette file est surchargée, alors les paquets doivent attendre un

temps considérable avant d'être envoyés. Ainsi, chaque protocole génère des performances en fonction de sa propre stratégie pour gérer la file d'attente.

Comme le montre la figure 2.11(a), les protocoles de routage basés sur la position, GPSR, VADD et HLAR, surpassent les autres mécanismes. Principalement, GPSR est le plus efficace, suivi par VADD, tandis que HLAR donne un peu plus de retard causé par le problème des régions vides. L'efficacité de ces protocoles dans différents scénarios de trafic s'explique facilement par l'utilité d'utiliser des noeuds voisins comme noeuds à prochain bond d'acheminement. Cette utilité réduit le nombre de sauts dans un itinéraire, donc le temps pris pour livrer le paquet de la source vers la destination est minime.

Le protocole réactif DSR est presque proche des mécanismes basés sur la position. Certes, ses régimes de découverte et de maintenance des routes influencent directement le délai de transmission, mais l'avantage de la mémoire cache fait en sorte que DSR se rattrape et gagne du temps au moment de la découverte. Pour le protocole pro-actif OLSR, celui-ci peut provoquer une congestion sur le réseau, donc il est tout à fait normal que le délai soit légèrement supérieur aux protocoles susmentionnés, c'est à dire GPSR, VADD, HLAR et DSR. Quant au protocole DSDV, il est plutôt élevé par rapport à OLSR en raison des mises à jour fréquentes lors de la diffusion. En ce qui concerne DYMOUM et AODV, ces deux protocoles réactifs produisent un retard relativement haut. Pour le protocole AODV, il a un bon résultat lorsque le réseau est moins chargé alors que c'est le contraire pour DYMOUM. Finalement, l'imprécision du routage que connaît le protocole pro-actif FSR a provoqué de faibles performances. Pour terminer cette discussion, nous pouvons constater que les résultats les plus bas reviennent au protocole hybride ZRP.

#### *b) Délai de bout en bout en fonction de la densité du réseau*

La figure 2.11(b) montre que le délai de livraison des paquets est influencé par la densité du réseau. Nous notons que les protocoles géographiques, GPSR, VADD et HLAR, sont les plus efficaces. En particulier, GPSR dépasse VADD et HLAR grâce à la densité qui influence positivement la précision de l'emplacement géographique des noeuds. Certes, GPSR a un délai de livraison de données relativement bas (figure 2.11(b)), mais ce n'est pas significatif simplement en raison de sa médiocre performance en PDR. Une comparaison valide est lorsque GPSR et VADD ont un PDR similaire, par exemple à une densité de noeud supérieure à 60 dans la figure 2.10(b). En effet, dans ce cas, GPSR offre un délai légèrement plus long car il ne considère pas le modèle de trafic du véhicule lors de la prise de décision. En outre, le protocole VADD évalue, à chaque intersection, chaque route ramifiée basée sur la densité des voitures, la vitesse moyenne de la voiture et la longueur du segment, ainsi il essaie de choisir le chemin avec un délai minimum, ce qui améliore le délai. Par ailleurs, HLAR combine les mécanismes réactif et gourmand (*greedy*), du coup, il offre moins de performance en raison de sa nature réactive dans le processus de découverte de route.

N'ayant pas les moyens de collecter des informations géographiques, les protocoles DSR, OLSR et DSDV donnent respectivement des résultats faibles par rapport aux protocoles géographiques. En ce qui concerne les protocoles réactifs, DYMOUM est efficace par rapport à AODV car la topologie du réseau est découverte plus rapidement grâce au

concept d'accumulation. Pour le protocole FSR, il n'a la capacité de voir les objets que lorsqu'ils sont plus proches de son point focal, cela signifie qu'il faut un moment avant de localiser la destination lointaine. Puis vient le protocole ZRP qui est encouru par les méthodes IARP et IERP, et qui est lui aussi en croissance rapide, ce qui n'est pas tolérable.

Pour conclure, il est bien connu qu'il est important d'avoir des variations de retard de paquets très faibles, surtout vis-à-vis des applications multimédia qui exigent une transmission plus rapide. Ainsi, selon nos résultats, le protocole géographique GPSR est le plus approprié.

### 2.5.1.3 Mesure du débit

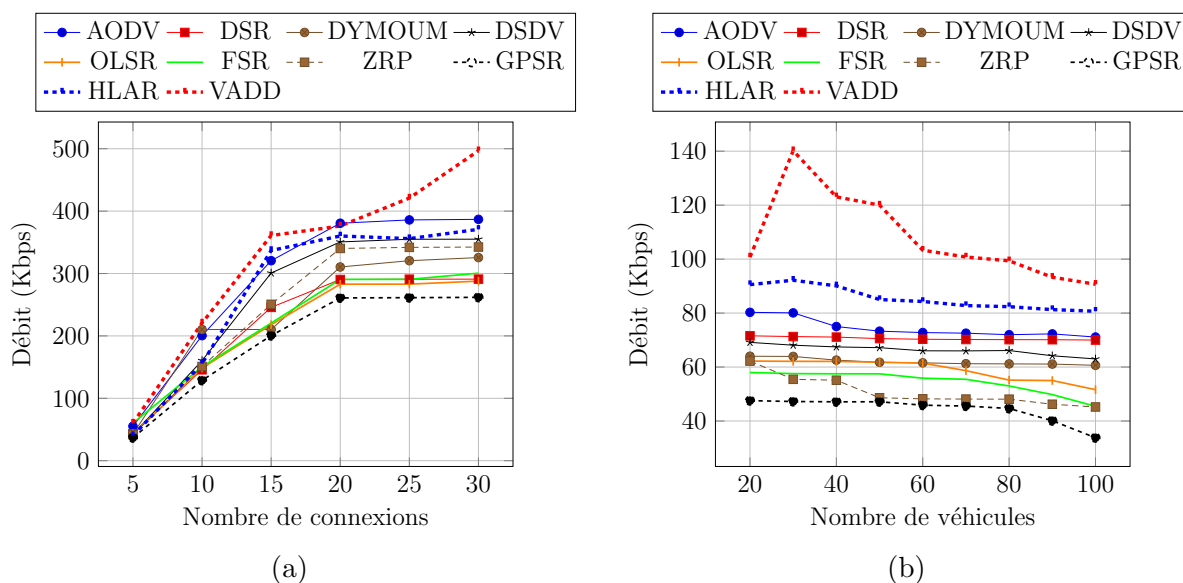


FIGURE 2.12 – Débit ; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité

#### a) Débit en fonction de la charge du réseau

Le débit peut être défini comme étant les données transférées pendant une période de temps. Il est exprimé en kilo bits par seconde (kbps) [106]. À mesure que les sources de trafic augmentent, le débit augmente en raison de l'augmentation du taux de transmission des paquets de données. Cela aide à améliorer la connectivité entre les sources de trafic.

Nous remarquons dans la figure 2.12(a) que le protocole VADD dépasse tous les autres protocoles. Particulièrement, lorsque le nombre de connexions est égal à 30, VADD les surpasse avec près de 100 kbps en raison de la fréquente découverte des chemins. Par la suite, AODV et HLAR montrent respectivement une augmentation progressive à mesure que le nombre de connexions augmente. Ils sont suivis par DSDV et ZRP. Le débit effectué par OLSR, DSR, FSR et DYMOUM est pratiquement similaire. La plus faible valeur, mais pas la pire, est générée par le protocole GPSR. Le débit de tous ces protocoles, à l'exception de celui de VADD, augmente sensiblement puis se stabilise à partir de 20 connexions.

*b) Débit en fonction de la densité du réseau*

En termes de densité, le débit diminue en fonction de deux conditions principales : les paquets de contrôle utilisés par le protocole et le nombre de fois que les noeuds mettent à jour l'itinéraire dans leurs table de routage. Il ressort de la figure 2.12(b) qu'il y a un effet considérable sur le débit lorsque le protocole VADD est utilisé. Ce dernier est suivi de façon marginale par le protocole HLAR. Cependant, en utilisant AODV, DSR et DYMOUM, le débit diminue légèrement à mesure que le nombre de noeuds dans le réseau change. Nous pouvons constater la même chose pour DSDV et OLSR, ce qui reflète une baisse des résultats en les comparant aux protocoles réactifs. FSR suivie par ZRP fournissent un faible rendement, mais les valeurs les plus déclinées sont ceux observées pour GPSR.

*2.5.1.4 Mesure de la surcharge**a) Surcharge en fonction de la charge du réseau*

Comme nous l'avons introduit au début de ce document, VANET est constitué de noeuds dynamiques et auto-organisés échangeant des informations via des liens sans fil. De plus, ces noeuds se comportent comme des routeurs responsables de l'acheminement des paquets. Ainsi, tout protocole de routage génère un flux supplémentaire de paquets RREQ et RREP qui surchargent momentanément le réseau.

Comme nous l'avons déjà présenté dans la section 4, la surcharge représente le rapport entre le nombre total d'octets des messages de contrôle (X) et le total des données reçues (Y) en plus des paquets de contrôle (X). Donc, si X est stable en fixant le nombre de noeuds, la surcharge diminuera évidemment à mesure que nous augmentons le nombre de connexions selon l'équation  $X/(X + Y)$ .

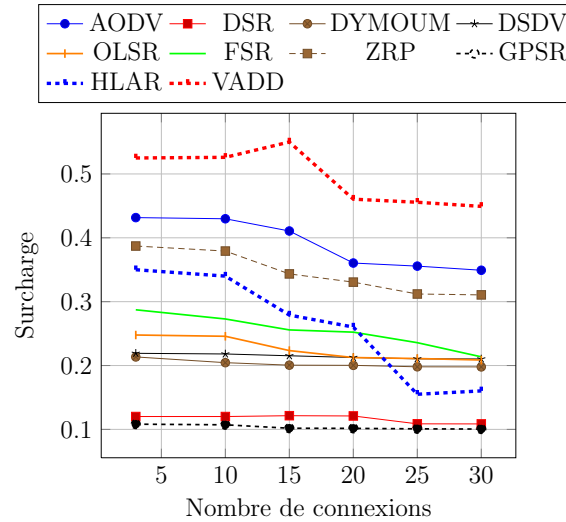
La figure 2.13 (a) montre la surcharge de routage par rapport aux dix différentes implémentations de protocoles en fonction de la variation de connexions dans un réseau dynamique. Comme nous avons utilisé 50 noeuds dans ce scénario de simulation, la charge reste presque stable car le nombre de paquets de contrôle est presque identique même si nous augmentons les connexions entre les noeuds. Le protocole GPSR fournit la plus faible surcharge, tandis que VADD procure la plus grande valeur.

*b) Surcharge en fonction de la densité du réseau*

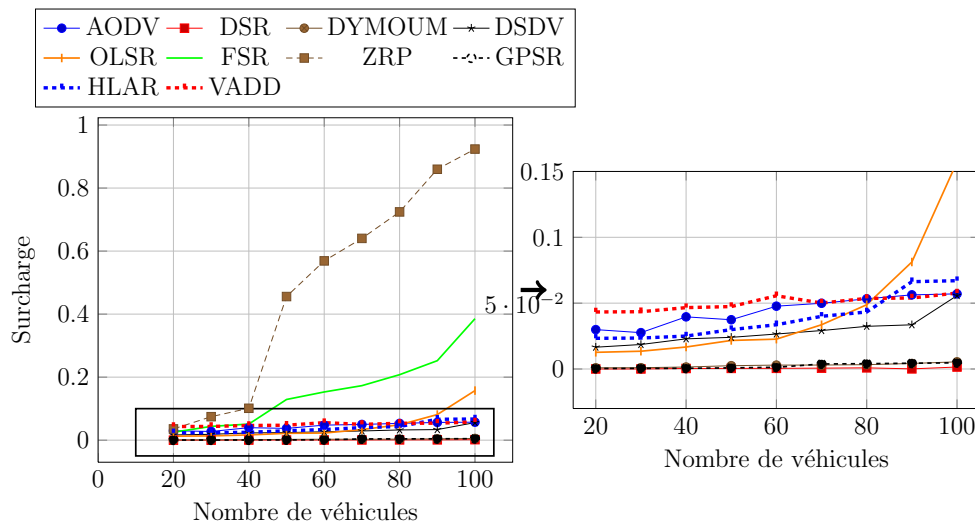
En terme de densité, la surcharge augmente lorsqu'il existe plus de paquets de contrôle dans le réseau. En effet, à partir du dernier exemple, si maintenant X change selon le nombre de noeuds tandis que Y reste fixe, la surcharge augmentera systématiquement à mesure que nous augmenterons le nombre de noeuds.

A partir des figures 2.13 (b) et (c), les résultats montrent que le taux de surcharge de routage en utilisant DSR, DYMOUM et GPSR est faible et constant pour les diverses densités de noeuds par rapport aux autres protocoles dont la surcharge augmente de manière exponentielle. Les valeurs élevées sont celles du protocole VADD qui utilise les fonctionnalités du routage géographique gourmand avec les systèmes L-VADD, D-VADD, MD-VADD et H-VADD. Ces derniers augmentent les frais généraux de routage (voir la

section 2.2.2.2). Les résultats de simulation montrent également que le taux de surcharge avec OLSR augmente de manière moyenne jusqu'à ce qu'il atteigne pleinement 90 véhicules. Ceci peut être expliqué par l'envoi fréquent des paquets de contrôle entre un grand nombre de véhicules.



(a)



(b)

FIGURE 2.13 – Surcharge; (a) en fonction de la charge, (b) en fonction de la densité

## 2.5.2 Analyse des résultats de QoE

La figure 2.14 (a), (b) et (c) illustre respectivement les trois paramètres objectifs PSNR, SSIM et VQM en fonction de la charge de trafic de données. Comme nous l'avons déjà défini, des valeurs de PSNR élevées reflètent plus de similitude. En ce qui concerne VQM, qui mesure le dommage sur la vidéo reçue, il doit être plus proche de 0 pour dire que le protocole est fiable. Quant à la mesure SSIM, elle reflète la meilleure qualité de la vidéo quand elle est égale à 1.

À partir de ces définitions, les résultats montrent clairement que les protocoles réactifs, AODV, DSR et DYMOUM, sont les plus performants côté charge du réseau en les comparant au reste des protocoles. En effet, cela peut être expliqué par leurs algorithmes de routage basés sur le principe du vecteur de distance. Les valeurs les plus faibles, par contre, sont ceux du protocole géographique GPSR en raison de la grande mobilité dans le réseau, ce qui influence la précision des positions géographiques des véhicules.

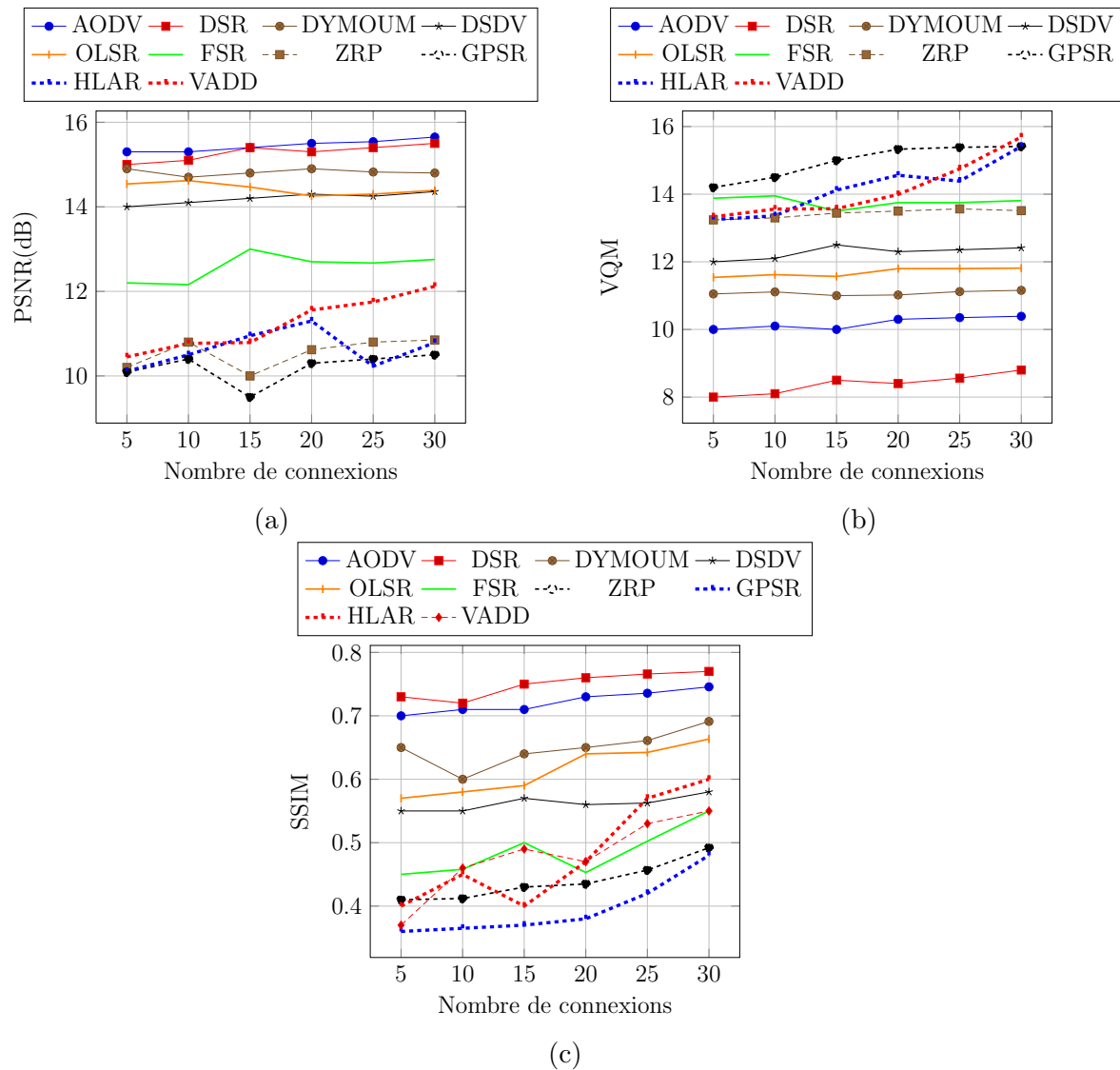


FIGURE 2.14 – Mesures de QoE en fonction de la charge du réseau : (a)PSNR, (b)VQM et (c)SSIM

Conjointement, pour le score d'opinion moyen MOS, les protocoles réactifs AODV, DSR et DYMOUM démontrent une bonne qualité perçue avec un MOS de 4. Alors que les protocoles basés sur la position VADD, GPSR et HLAR présentent une certaine dégradation par rapport aux autres avec un score de 2 (voir la figure 2.15).

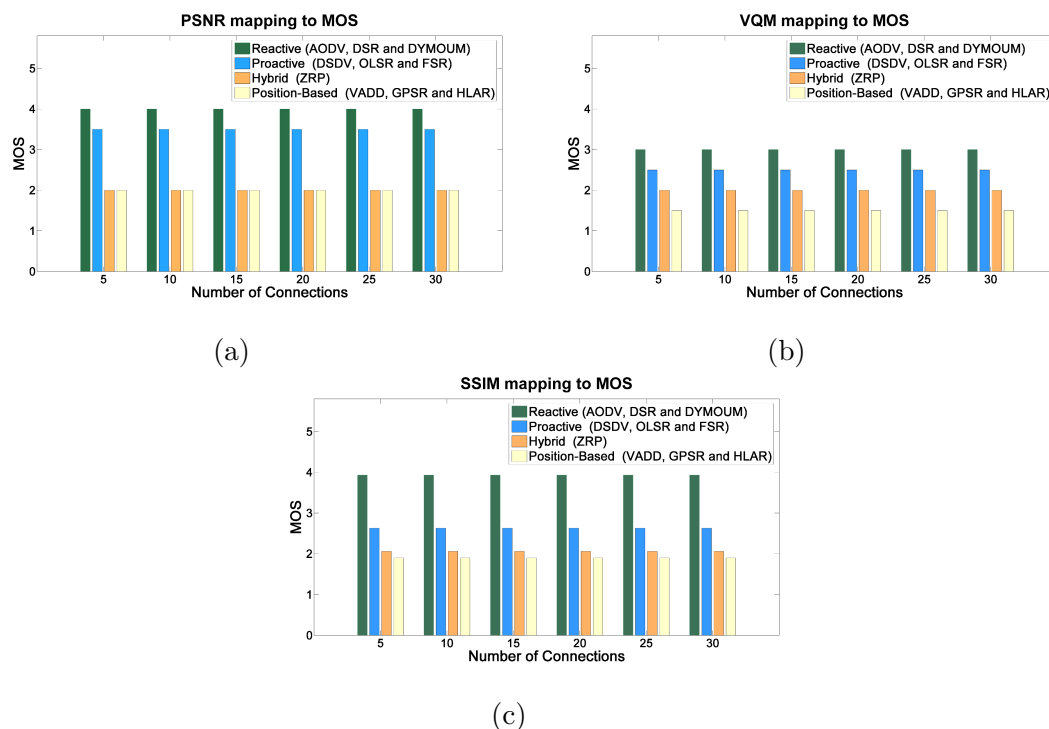


FIGURE 2.15 – Métrique MOS selon : (a) PSNR, (b) VQM et (c) SSIM

### 2.5.3 Discussion générale des résultats de QoS et de QoE

Comme mentionné durant notre analyse, il est important d'avoir un faible délai de transmission lors du partage des vidéos. À cette fin, nous choisissons les deux protocoles les plus prometteurs en termes de délai : DSR et GPSR, pour en tirer exemple. Ainsi, en tant que synthèse de notre analyse, nous pouvons délibérer à partir du tableau 2.8 que GPSR prend la meilleure position en terme de délai de transmission et de surcharge, respectivement jusqu'à 75% et 15,98%, par rapport à DSR. Cependant, les autres mesures de QoS, i.e, le taux de PDR et le débit, sont détériorés par GPSR, ce qui n'est pas tolérable. En effet, à partir des deux figures 2.10 (a) et 2.12 (a), on peut voir clairement que ces mesures sont plus faibles en utilisant GPSR par rapport aux autres protocoles. Par conséquent, GPSR diminue le PDR jusqu'à 67%, et le débit jusqu'à 33%. Donc, même si la stratégie de GPSR assure que le flux vidéo transmis arrive au bon moment à sa destination, mais ceci reste insuffisant car le PDR et le débit sont également des paramètres clés qui influencent la qualité multimédia. En outre, les protocoles de routage basés sur la position révèlent de faibles résultats même par rapport aux métriques de QoE. En effet, nous remarquons que le protocole GPSR diminue le PSNR et le SSIM, respectivement, jusqu'à 63,36% et 50,1%. la mesure VQM est également élevée jusqu'à 87%.

Pour conclure cette section, si la QoE a été prise en compte lors de l'élaboration d'approches de routage, son effet dépendra de la mise en oeuvre des concepteurs. Elle peut alors améliorer les qualités perceptibles du réseau ou réduire la bande passante avec l'élimination des informations non perçues.

TABLE 2.8 – Comparaison entre GPSR et DSR selon la charge de trafic

Connexions	QoS				QoE		
	PDR	Délai	Débit	Surcharge	PSNR	VQM	SSIM
5	↓67%	↓75.02%	↓15%	↓10.07%	↓53.20%	↑87%	↓47.3%
10	↓67%	↓56.12%	↓28%	↓10.66%	↓62.82%	↑86.58%	↓50.1%
15	↓64%	↓48.47%	↓37%	↓15.98%	↓63.36%	↑80.23%	↓48.57%
20	↓56%	↓71.85%	↓33%	↓15.62%	↓52.17%	↑83.64%	↓46.47%
25	↓55%	↓71.95%	↓34%	↓7.43%	↓52.32%	↑83.75%	↓46.56%
30	↓51%	↓70.82%	↓33.5%	↓7.78%	↓52.25%	↑83.88%	↓46.59%

## 2.6 Résultats de simulation face aux tendances de la qualité de vidéo

Dans la pratique, les exigences de QoS qui affectent la visualisation à distance sont : 1) un faible délai, 2) un débit et une bande passante élevés et 3) une faible latence. Selon les auteurs de [9], la latence devrait être inférieure à 4 jusqu'à 5 secondes selon les capacités de mise en mémoire tampon de l'application vidéo. En outre, la perte de paquets ne devrait pas dépasser 5%. Sur la base de nos constatations, nous pouvons dire que AODV et DSR répondent aux deux exigences, i.e. délai et pertes de paquets, car ils ne dépassent pas un délai de 5 secondes pour transmettre un paquet de la source vers la destination. De plus que la quantité de données reçues (PDR) représente environ 95% des données qui ont été envoyées avec une moyenne de vitesse de 300 Kbps. Cependant, le choix du protocole approprié pour router des paquets dépend des préférences de l'utilisateur. Par exemple, en fonction des résultats de nos simulations, si la mesure d'intérêt est la vitesse sans aucune interruption et indépendamment de la qualité, alors les protocoles basés sur la position sont les mieux classés. Bien que, si l'on veut améliorer la qualité indépendamment des ruptures, les protocoles réactifs sont le choix le plus convenable. Nous mettons l'accent sur le fait que ces résultats et constatations sont limités à la transmission vidéo de type MPEG-4. Ainsi, si la méthode de codage est différente, la performance peut changer selon le type choisi.

Étant donné que la mesure la plus importante pour un utilisateur est le temps de transmission (c'est-à-dire la réception d'un message vidéo en peu de temps avec le maximum d'information possible), les protocoles basés sur la position devraient être les plus pris en compte. Cependant, des améliorations doivent être envisagées afin d'améliorer les autres mesures de QoS, à savoir, le PDR, le débit et la surcharge. Par conséquent, les auteurs de [107] et [108] considèrent non seulement les positions, mais aussi la vitesse, la direction et la qualité du lien pour obtenir un taux de livraison de paquets plus élevé. En revanche, les deux modèles de prédiction sont simples. Leur approche pourrait être significative si l'algorithme de calcul du poids est amélioré en mettant en oeuvre des informations plus précises en utilisant un modèle complexe (par exemple, les chaînes de Markov et les réseaux de neurones artificiels) afin d'accroître la précision des prédictions. Dans [109], les auteurs proposent un protocole amélioré basé sur la position qui contrôle la congestion du réseau en fonction du tampon. La proposition prend en compte non seulement la localisation géographique des noeuds, mais aussi la durée du tampon résiduel des noeuds. En

outre, pour surmonter le problème de qualité, le routage multi-chemins peut être utilisé. En fait, la transmission de flux vidéo à travers des protocoles de routage multi-chemins dans VANET améliore la qualité de la transmission vidéo. Les auteurs de [110] proposent un protocole de routage d'état de liaison optimisé multi-chemins (MP-OLSR) basé sur l'algorithme *Dijkstra*. L'algorithme offre une flexibilité et une extensibilité en considérant différents paramètres de liaison et diverses fonctions de coûts. Au lieu d'utiliser le nombre de sauts comme métrique unique dans MP-OLSR, les auteurs de [1] ont utilisé une nouvelle métrique de routage basée sur des métriques de qualité de liaison multiple pour trouver le meilleur chemin en termes de QoS.

Dans le contexte de rapidité, le concept de prédiction est attrayant pour les protocoles réactifs et pro-actifs. En effet, les chercheurs de [44, 67] ont pu surmonter certains problèmes de vitesse, comme les ruptures de liens fréquentes dues à la topologie hautement dynamique, par approche prédictive. Par conséquent, pour obtenir une qualité à grande vitesse, nous pouvons anticiper la rupture des itinéraires et l'ajustement de l'intervalle de création d'itinéraire, ce qui va engendrer une diminution de la probabilité d'échec d'itinéraire, impliquant par conséquent une augmentation du délai de bout en bout.

Le tableau 2.9 présente les résultats complets de tous les protocoles analysés.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif principal est d'une part, de confronter par la simulation, à l'aide de NS-2, les performances de dix protocoles de routage : DSR, AODV, OLSR, DYMOUM, DSDV, ZRP, VADD, HLAR, GPSR et FSR. D'autre part, d'examiner l'impact de la charge du trafic et de la densité des noeuds sur le comportement de ces protocoles. Les résultats montrent qu'il n'y a pas un protocole favorable pour tous les critères d'évaluation. En effet, chaque protocole a des comportements différents envers les métriques de performances considérées, notamment le coût de routage, le taux de paquets délivrés, le délai et le débit. En revanche, le délai est une mesure très délicate qui a été significativement respectée par le protocole GPSR durant les simulations. Ceci nous a encouragé à le choisir pour des éventuelles améliorations qui seront présentées dans la suite de ce mémoire.





---

## Sommaire

---

3.1	Introduction . . . . .	63
3.2	Préliminaires . . . . .	64
3.3	Mécanismes de routage du protocole GPSR . . . . .	64
3.3.1	Routage basé sur la méthode gourmande « <i>greedy</i> » . . . . .	65
3.3.2	Routage basé sur le périmètre . . . . .	68
3.4	Travaux antérieurs basés sur le protocole GPSR . . . . .	71
3.5	Conclusion . . . . .	73

---

### 3.1 Introduction

Tout d'abord, il est important de se rappeler que le routage efficace absolu n'existe pas. Étant donné le financement, le temps et les bonnes circonstances, presque tout protocole de routage peut être rompu. Cela ne veut pas dire que le concepteur ne devrait pas faire de son mieux pour se prémunir contre tous les défis affrontés par les réseaux complexes, y compris les réseaux VANET. Bien évidemment, l'objectif de la communauté responsable du routage doit être le développement des ressources nécessaires pour satisfaire le besoin d'un protocole de routage afin que celui-ci puisse compromettre le bon acheminement des données.

Par ailleurs, il n'existe pas un routage générique vu la variété des applications possibles et les exigences relatives à leur bon déroulement. Autrement dit, la notion de routage varie selon le type d'application visé.

Toutefois, parmi toutes les approches d'acheminement existantes, l'approche géographique est attestée par la plus part des chercheurs scientifiques comme étant le choix idéal lorsque nous faisons face aux réseaux VANET [111]. En effet, ce type de rouage se base principalement sur la localisation géographique sans tenir compte d'aucune découverte ou maintenance de routes à l'opposé des autres processus de routage classique.

La position d'un noeud peut être fournie par des protocoles particuliers, comme par exemple GPS, SLURP (*Scalable Location Update Routing Protocol*) [112] et GLS (*Grid Location Service*) [113]. Une fois la position est obtenue, il reste à acheminer le message. Pour ce faire, plusieurs protocoles de routage géographique sont à l'étude, tels que REGR (*A Region-Based Routing Protocol For Wireless Mobile ad-hoc Networks*) [114], DREAM (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility Protocol*) [115] et GPSR.

Le protocole GPSR représente un excellent exemple pour bien assimiler l'interprétation typique du concept géographique. Il garantit un passage à l'échelle grâce à l'utilisation des informations locales seulement, i.e., les informations diffusées à l'intérieur de sa portée de transmission radio. Suite à l'intérêt accordé par les chercheurs, plusieurs approches ont été proposées pour gérer son mécanisme et l'adapter à la topologie compliquée du réseau VANET [116, 117, 118, 119, 120, 121].

Le but de ce chapitre est de définir notre position exacte dans ce domaine large de la recherche en routage afin de clarifier le contexte de ce travail et la perspective suivie. Pour cela, le protocole de routage géographique GPSR va être présenté en détail en étant le noyau de notre étude de recherche.

### 3.2 Préliminaires

Tout au long de ce chapitre, nous aurons recours à des mots clés représentant les principaux composants participants au routage GPSR.

Nous considérons un réseau de véhicules sans fil avec  $N = \{ n_1, \dots, n_k \}$  est l'ensemble des véhicules parcourant aléatoirement une zone urbaine. Chaque  $n_k$  se caractérise par une transmission radio  $R_{TR}$  selon la norme IEEE 802.11p de la couche MAC. Soit  $NR_k$  la désignation de l'ensemble des noeuds voisins se trouvant à l'intérieur de la portée de transmission radio  $R_{TR}(n_k)$  de  $n_k$ . Étant dans un contexte géographique, chaque noeud  $n_k$  est équipé d'un récepteur GPS qui lui fournit sa propre position. Les HELLO messages informent les voisins à ce sujet. Ceci permet à chaque  $n_k$  de connaître toutes les positions de ses  $nr_k$  directement situés dans le  $R_{TR}(n_k)$ . Concernant la position de la destination, nous supposons qu'elle est connue. Par ailleurs,  $d_{ij}$  indique la distance entre le voisin  $nr_i$  et la destination  $n_j$ , avec  $i$  et  $j \in [1, N]$ . Le véhicule  $nr_i$  est qualifié comme le prochain saut apte à transférer le paquet arrivant, si et seulement si,  $d_{ij}$  est la distance minimale parmi toutes les  $d_{kj}$ . Nous mentionnons que la portée de transmission radio  $R_{TR}(n_k)$  est liée au rayon  $r$  où une communication réussie peut être effectuée à partir de  $n_k$  et de n'importe quel noeud  $n_i$  où  $D_{ik} < r$ .

### 3.3 Mécanismes de routage du protocole GPSR

GPSR est un protocole de routage autant unicast que géographique. Il a été conçu spécifiquement pour les réseaux MANET puis rapidement été sollicité par les chercheurs pour être utilisé dans les VANET (voir la section 2.2.2). Au fil des années, GPSR est devenu parmi les mécanismes les plus prometteurs et actuellement le plus déployé. En effet, il est le sujet de plusieurs recherches et la base de nombreuses variantes de routage (voir la section 3.4).

Le mécanisme de routage de GPSR consiste à basculer, si nécessaire, entre deux démarches. La première c'est la démarche de l'expédition gourmande ou *greedy*, tandis que la seconde c'est l'expédition par périmètre. Cette dernière présente un processus de récupération que GPSR utilise seulement en cas de faille (voir la figure 3.1).



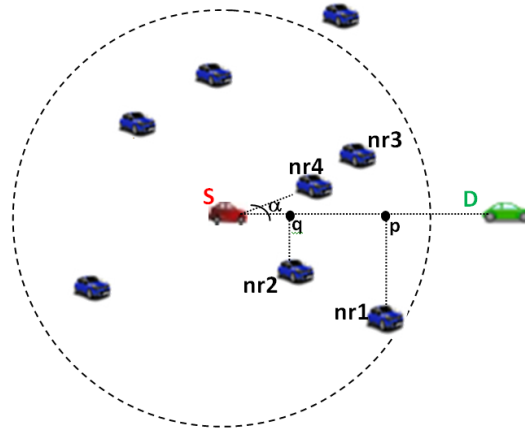


FIGURE 3.2 – Illustration des algorithmes d’acheminement des paquets de données

TABLE 3.1 – Algorithmes d’acheminement des paquets de données

Algorithme	Description
MFR	Choisie le $nr_i$ qui maximise la distance depuis S jusqu’à y ( $nr_1$ )
NFP	Choisie le $nr_i$ qui minimise la distance depuis S jusqu’à x ( $nr_2$ )
GRS	Utilise le $nr_i$ le plus proche de la destination D ( $nr_3$ )
COMPASS	Choisie le $nr_i$ qui minimise l’angle $\alpha$ tenant compte en même temps celui qui le plus proche de D ( $nr_4$ )

$nr_1, nr_2, nr_3$  et  $nr_4$  sont les prochains sauts voisins élus et illustrés dans la figure 3.2

### 3.3.1.2 Principe de balisage

Généralement, l’échange des informations de base, c’est-à-dire la position, l’accélération et la direction entre les véhicules communicants dans une zone prédéfinie, joue un rôle important dans l’efficacité d’un réseau ad-hoc. Cet échange se fait par l’intermédiaire des émissions périodiques des paquets de balises connus aussi sous le nom de paquets HELLO. En fait, le comportement d’un  $n_k$  dépend du comportement de  $nr_k$  car il doit détecter le lien optimal avant qu’il ne commence à transmettre des paquets aux véhicules se trouvant dans sa portée radio. Ainsi, avant que  $n_k$  commence son processus de transfert, il doit d’abord découvrir l’ensemble des  $nr_k$  qui se trouvent dans son  $R_{TR}(n_k)$  (voir le tableau 3.2). Une fois que ces informations sont recueillies,  $n_k$  les conserve dans une structure de données pour que celle-ci soit utilisée à chaque fois que cela est nécessaire lors du processus de routage.

Comme nous l’avons mentionné au début de ce chapitre, le protocole de routage GPSR considère la localisation géographique de tous les noeuds dans le réseau puisqu’il peut connaître l’ensemble de  $nr_k$  à l’avance. En fait, la découverte  $nr_k$  est réalisée par une stratégie de balisage simple. Cette stratégie fournit périodiquement l’emplacement exact de chaque  $n_k$  et  $nr_k$ . Par conséquent, les paquets sont marqués par leurs sources et les positions de leurs destinations finales [116], et donc ils sauront choisir leurs routes.

TABLE 3.2 – Contenu de la liste des voisins d'un noeud N

Identifiant du voisin	Position $p(x,y)$	Temps de réception du paquet HELLO
-----------------------	-------------------	------------------------------------

### 3.3.1.3 *Avantage du processus greedy*

L'intérêt éminent du protocole GPSR revient au fait qu'il s'oppose à certaines limitations du routage topologique grâce aux informations géographiques collectées par le moyen des dispositifs de localisation tels que GPS [127]. D'autres avantages se manifestent, à savoir :

- le noeud transmetteur n'a pas une vision générale de toute la topologie, mais plutôt d'un seul niveau :  $R_{TR}(n_k)$  ;
- les paquets sont marqués par leurs propres positions ainsi que celles de leurs destinations. En conséquence, chaque transmetteur choisit le chemin le plus optimal en termes de distance pour acheminer le paquet vers le prochain saut élu ;
- l'itinéraire est déterminé uniquement lorsqu'il existe un besoin de transfert de paquet, ce qui minimise les chances d'encombrer le réseau ;
- au fur et à mesure que la densité du réseau augmente, l'exploitation des chemins les plus courts est systématique ;
- La nature auto-descriptive des coordonnées géographiques qui permet d'interpréter l'emplacement de la destination dans un paquet pour prendre une décision d'acheminement purement locale. Ceci n'est pas le cas pour les protocoles de routage traditionnels ;
- la méthode de balisage est tout ce que l'expédition *greedy* requiert pour la découverte des routes. Avec cette méthode, la consommation de la bande passante est considérablement modérée par rapport aux protocoles traditionnels qui gèrent l'état global du réseau ;
- l'expédition *greedy* prend des décisions purement locales, ainsi elle est qualifiée de robuste.

### 3.3.1.4 *Limitations du processus greedy*

Il existe des scénarios où le seul itinéraire vers une destination requiert un déplacement de paquets plus loin en terme de distance géométrique de la destination. Un exemple simple d'une telle situation est illustré dans la figure 3.1 (b). Ici, S est plus proche de D que ses voisins X et Y. En plus, le cercle pointillé autour de D a un rayon égal à la distance entre S et D. Bien que deux chemins existent vers D, S ne choisira pas de passer à X ou à Y en utilisant un renvoi *greedy* car il représente un maximum local à proximité de D. Par conséquent, un autre mécanisme doit être utilisé pour transférer des paquets dans ce genre de circonstances et que nous allons définir dans la section 3.3.2.

Nous avons remarqué deux autres limitations qui ont ouvert la voie aux contributions de ce travail de thèse. La première correspond au fait de sélectionner un voisin en se basant uniquement sur une seule mesure qui est la distance, hors que celle-ci n'est pas assez suffisante pour assurer une bonne QoS du réseau. En particulier, pour les applications multimédia qui exigent des transmissions en temps réel, la QoS se montre obligatoire. Le chapitre 4 répond à cette problématique. La deuxième limitation réside sur le manque d'exploitation des chemins de la topologie. En d'autres termes, la méthode *greedy* nous

permet d'utiliser un seul et unique chemin pendant le transfert des paquets (voir figure 3.3(a)), et donc le lien d'acheminement peut devenir condensé et encombré par une quantité importante de paquets. D'où la question, est ce que nous pouvons considérer un nombre déterminé de sauts optimaux pour chaque noeud expéditeur afin d'exploiter positivement la topologie et par la suite équilibrer la charge des paquets entre les liens élus (voir figure 3.3(b)). Le chapitre 5 répond à cette interrogation.

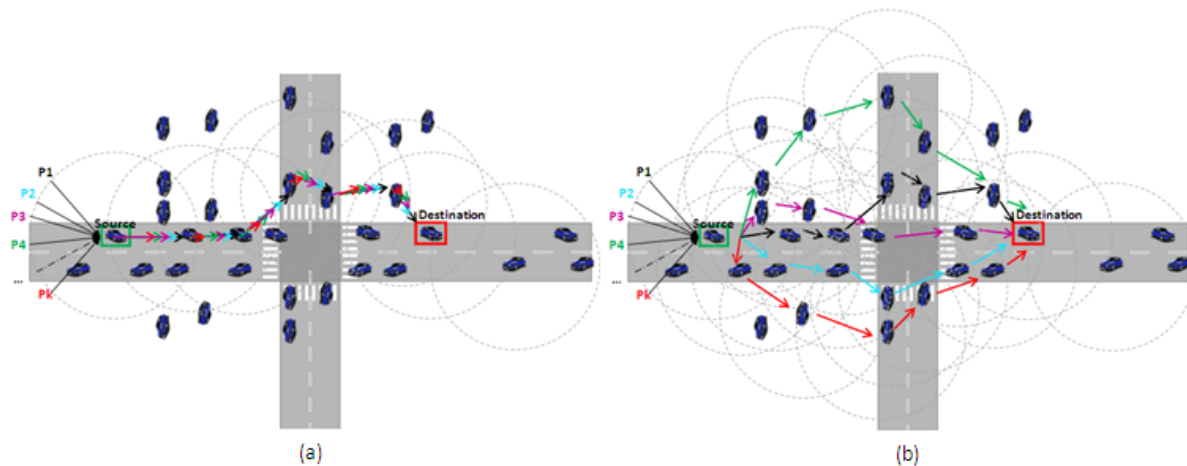


FIGURE 3.3 – Routage *greedy* en cas de : a) un meilleur prochain saut et b) n meilleurs prochains sauts

### 3.3.1.5 Rôle de la densité du réseau

Le rôle de la densité du réseau sur le routage géographique est primordial, c'est ce qui a été démontré par les chercheurs dans [62]. En effet, comme synthèse de leur étude, l'expédition *greedy* tend à trouver toutes les routes sur les réseaux les plus larges et les plus denses, mais ne parvient pas à trouver certaines voies dans une zone à moyenne densité. Sur des réseaux très clairs, il y a tellement de noeuds et, par conséquent, les itinéraires en générale contiennent tellement de sauts que les vides sont très rarement trouvés sur un chemin entre une source et une destination. À savoir que les vides se produisent lorsque deux cercles superposés sont vides de noeuds. Par conséquent, l'expédition *greedy* tend à trouver toutes les routes à mesure que la densité des noeuds augmente.

En outre, la portée radio des véhicules a un effet sur le taux de réussite de l'expédition *greedy* dans la recherche de routes. En effet, dans les simulations de leur étude, les auteurs ont considéré une topologie de 1500 m sur 300 m. La dimension de la zone simulée n'est pas beaucoup plus longue que la portée radio de 250 m, ce qui évitera les vides dans une telle région où la portée radio d'un noeud couvre presque toute la dimension de la région.

### 3.3.2 Routage basé sur le périmètre

Quand le noeud expéditeur est considéré comme un maximum local dans sa proximité géographique par rapport à la destination, la stratégie d'expédition *greedy* devient alors inefficace (voir la figure 3.1(b)).

En affrontant ce problème, le noeud passe à un autre processus basé sur le périmètre qui utilise la règle de la main droite. En fait, grâce à cette stratégie, un graphe planaire est tiré en prenant en compte le noeud qui possède le paquet, ses voisins extrêmes qui sont plus éloignés de la destination et la destination finale. À travers le graphe, le noeud utilise la règle de la main droite pour sélectionner un prochain saut ou pour atteindre la destination finale (voir la figure 3.1(c)). Dès lors que le problème du maximum local est évité, l'approche *greedy* prend le relais.

### 3.3.2.1 Graphe planaire

Un graphe dans lequel on ne trouve pas deux lignes croisées est connu sous le nom de graphe planaire. Un ensemble de noeuds ayant la même portée circulaire de communication avec un rayon identique  $r$ , peuvent être considérés comme un graphique. Le graphe de voisinage relatif RNG (*Relative Neighborhood Graph*) et le graphe de gabriel GG (*Gabriel Graph*), introduits par gabriel et Sokal, sont deux graphes planaires très connus dans des disciplines variées[62, 128, 129].

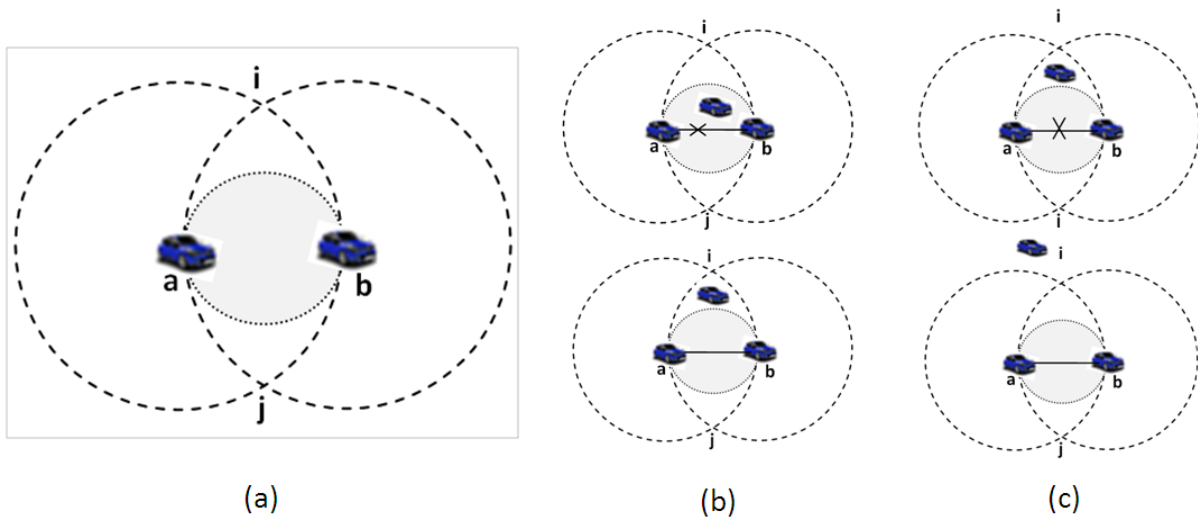


FIGURE 3.4 – Illustration des graphes planaires : (a) graphes GG et RNG, (b) graphe GG et (c) graphe RNG

Pour augmenter le taux de réussite d'acheminement des paquets, chaque noeud construit un graphe du réseau lui permettant de diminuer les possibilités de routage. Ce graphe permet de représenter le réseau avec moins de noeuds pour éviter les liens croisés [130]. Le GG est un ensemble de noeuds  $N = \{ N_1, \dots, N_{i+1}, \dots, N_{i+n} \}$  tel qu'il n'existe aucun noeud dans la portion de disque de rayon  $d(N_i, N_{i+1})$  des deux noeuds concernés, avec  $N_{i+1}$  étant le noeud le plus éloigné dans la zone de couverture de  $N_i$ . Autrement dit, étant donné un ensemble  $N$  de  $n$  points, on appelle graphe de gabriel le graphe ayant pour sommet tous ces points. Une arête relie deux points  $x, y \in S$  si, et seulement si, le cercle de diamètre  $xy$  est vide (voir la figure 3.4(b)).

Contrairement au graphe GG qui prend en considération le cercle de la lune comme région témoin, le graphe RNG prend comme région témoin la lune elle-même (voir la figure 3.4 (c)).

La figure 3.5 a été inspirée du travail [131] et représente un exemple de la règle de la main droite appliquée sur le graphe GG. le noeud S veut expédier un paquet vers la destination D. Le prochain noeud élu sera celui qui formera un angle avec la ligne droite entre S et D dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (N2). Par la suite, en suivant la règle de la main droite, quand un paquet arrive du noeud  $N_j$  à un noeud donné  $N_i$ , le prochain saut sera le successeur de  $N_i$  dans le sens inverse des aiguilles d'une montre par rapport à  $N_i$  à partir du lien  $\overrightarrow{N_i N_j}$ .

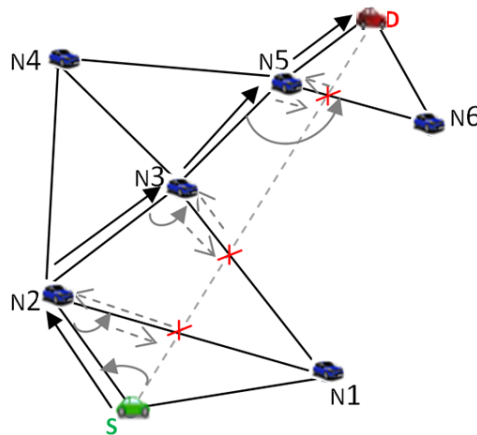


FIGURE 3.5 – Règle de la main droite

La figure 3.6 illustre un exemple de scénario qui rassemble l'utilisation des deux démarches d'acheminement de GPSR, à savoir, la démarche *greedy* et la démarche par périmètre, selon les cas affrontés.

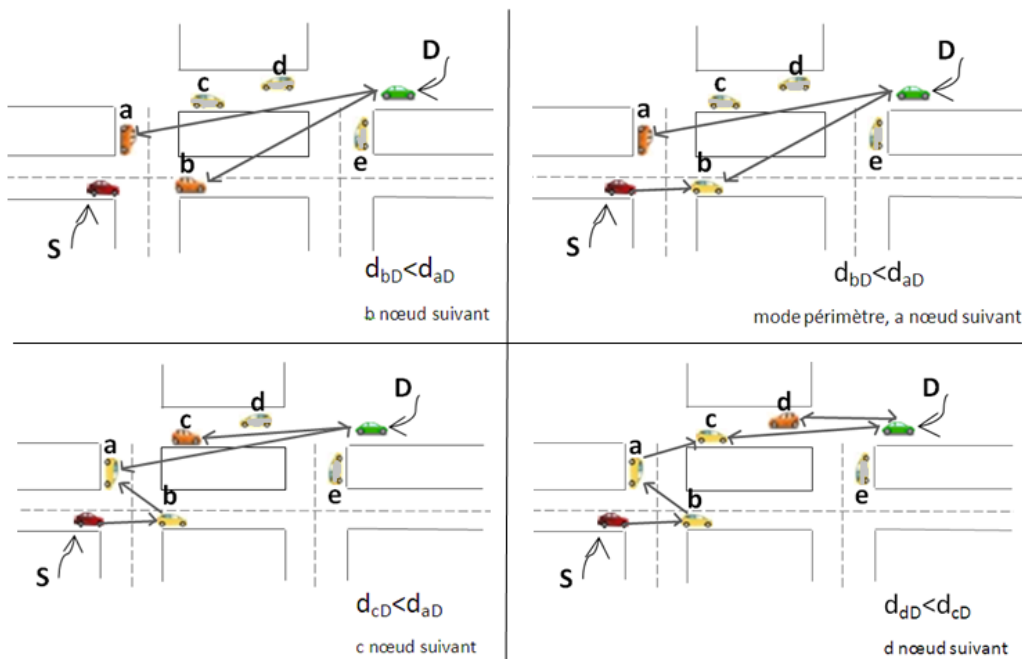


FIGURE 3.6 – Exemples de scénarios avec le protocole GPSR

### 3.4 Travaux antérieurs basés sur le protocole GPSR

Dans cette section, quelques exemples d’alternatives existantes concernant le protocole de routage GPSR sont présentés. Ils sont regroupés dans le tableau 3.3 par ordre chronologique.

TABLE 3.3 – Les travaux de recherche basés sur l’implémentation de GPSR

Références	Variante GPSR	Années
[132]	GPCR	2005
[133]	GyTAR	2007
[134]	GPSR-L	2008
[135]	Improved GPSR Routing Strategy	2012
[136]	GSR	2013
[137]	Dynamic packet beaconing for GPSR	2015
[109]	E-GPSR	2015
[138]	I-GPSR	2016
[139]	EC-GPSR	2016
[140]	D-GPSR	2016
[141]	GPSR+PRedict	2017

Dans un environnement hautement dynamique tel que VANET, des mesures pour le bon acheminement des données doivent être prises considérablement. GPSR a connu et connaît jusqu’à nos jours beaucoup d’intérêt auprès de la population scientifique. Effectivement, plusieurs études ont été publiées afin d’analyser les performances de GPSR et d’en tirer des variantes améliorées.

À cause de la variation imprévisible de la densité du réseau selon l’espace et le temps, il est peu pratique de créer des graphiques planaires avec GPSR. Pour faire face à ce problème, le protocole de routage géographique GPCR a été conçu par les auteurs de [132]. En effet, afin de promouvoir le routage, GPCR propose une stratégie de réparation basée sur la disposition des rues et des intersections. Sa principale contribution est la manière de détecter les véhicules aux intersections sans carte numérique. Cependant, ce protocole peut entraîner des sauts redondants dans les environnements urbains en raison de l’utilisation de la règle de la main droite. GPCR est fonctionnel dans deux scénarios, notamment la ville et l’autoroute.

Dans le travail [133], les chercheurs ont proposé un protocole de routage ad-hoc inter-véhicules appelé GyTAR. Son objectif est d’adapter le routage *greedy* aux environnements urbains. GyTAR se compose de deux modules : (1) une sélection dynamique des jonctions par lesquelles un paquet doit passer pour atteindre sa destination, et (2) une stratégie *greedy* améliorée et utilisée pour transférer des paquets entre deux jonctions. Les résultats de la simulation ont montré une amélioration significative de la performance en termes de taux de livraison des paquets, de délai de bout en bout et du coût de routage.

D’autre part, il existe une autre amélioration de GPSR pour faire face à des situations dans lesquelles, en raison d’une qualité de signal faible ou d’une zone à mobilité

intense, un noeud sanctionne un voisin comme étant inexistant alors qu'il est en réalité toujours présent dans sa couverture de transmission. En effet, pour résoudre ce problème, les auteurs de [134] ont introduit la notion de vie. La durée de vie représente le temps pendant lequel un noeud donné peut exister et est calculée en utilisant la différence de distances entre les noeuds calculés avec l'information de deux messages Hello consécutifs. Il est à noter qu'un noeud disparaît uniquement lorsque deux critères sont remplis : le temps pendant lequel le noeud devrait recevoir le message et la durée de vie du noeud ont expirés. Ainsi, il est possible de percevoir que les meilleurs noeuds à choisir sont ceux qui ont une durée de vie plus longue afin d'assurer un renvoi efficace.

En outre, en prenant en considération la densité du véhicule, la direction du déplacement et la vitesse, une nouvelle stratégie de routage basée sur le protocole de routage GPSR est proposée [135]. Par rapport à celles déjà existantes, cette proposition comporte trois différences : (1) le paquet Hello est conçu avec la fonctionnalité de définir précisément des véhicules voisins dans la plage de transmission de l'expéditeur ; (2) la priorité est configurée sur les voisins de l'expéditeur et le prochain véhicule élu est sélectionné de telle manière qu'il ne soit pas le plus proche de la destination. La distance et la vitesse sont prises en compte. (3) le «Quorum» est considéré comme un tampon et le paquet de données est relâché pour résoudre le problème du maximum local. Le GPSR amélioré présente de meilleures performances sur le taux de livraison des paquets et le coût du routage.

Par ailleurs, comme il est cité dans la section 3.3.1.4, l'inconvénient de GPSR c'est qu'il augmente la possibilité d'obtenir un maximum local et par la suite il peut causer une rupture de liaison en raison de deux problèmes majeurs de VANET : la mobilité élevée des véhicules et la structure topologique urbaine. Pour faire face à ces problèmes, un protocole de routage de source géographique basé sur la position (GSR) est mis en place par les chercheurs [136]. GSR utilise l'algorithme de Dijkstra pour calculer le chemin le plus court en se basant sur les intersections de séquence que le paquet doit traverser.

Une autre étude discute l'impact de l'intervalle de temps entre chaque paquet de balise (BPIT) et l'impact de la vitesse de déplacement du noeud (NMS) sur l'exactitude du lieu où se trouve l'information [137]. Pour surmonter cette problématique, une stratégie de balisage dynamique basée sur la logique floue (FLDB) est proposée. En effet, la stratégie suggérée vise à améliorer la fiabilité de la liste des voisins en optimisant le temps entre les transmissions des paquets de balise. L'optimisation est basée sur la corrélation entre NMS, le nombre de noeuds voisins (NNN) et l'intervalle BPIT qui représentent des mesures d'entrée du contrôleur de la logique floue CLF. La simulation prouve l'efficacité du mécanisme FLC dans l'amélioration de la performance globale du protocole GPSR en termes de surcharge de contrôle de paquets de balises, de retard de bout en bout, de saut non optimal et de position de faux noeud.

Dans le papier [109], les auteurs se sont intéressés au problème de la congestion du réseau causée par la diffusion multiple. En effet, le fait d'envoyer des paquets vers le même noeud en même temps, ou d'une façon successive, risque d'encombrer le noeud récepteur. À cette fin, la variante E-GPSR (*Enhanced GPSR*) du protocole GPSR a été proposée pour les VANET. Le protocole E-GPSR prend en considération non seulement l'emplacement géographique des noeuds mais aussi la taille du tampon des noeuds. Les résultats de

leur simulation montrent un taux de perte de paquets inférieur avec moins de retard de transmission par rapport à GPSR.

Dans le même contexte, les auteurs de [120] montrent que leur amélioration nommée I-GPSR (*Improved GPSR*) a les meilleurs résultats pour contrôler la congestion. I-GPSR est facile à mettre en oeuvre et aucune infrastructure supplémentaire n'est requise. Il fournit une communication sécurisée car les messages ne sont pas inondés à tous les véhicules. Le temps de transfert des messages est aussi très bas car le message est transmis à un véhicule qui a une vitesse maximale. Les auteurs ont comparé leur variante avec GPSR et E-GPSR. Ainsi, I-GPSR a un taux élevé de livraison de paquets, un délai de transfert bas, un débit élevé et une charge minimale du réseau.

Le protocole GPSR a eu aussi un très grand intérêt auprès des chercheurs dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil (RCSF). En effet, afin de maintenir une couverture efficace et d'assurer une sécurité lors des transmissions, les auteurs de [139] ont introduit la conception du protocole autonome ERA (*Efficient Route Autonomous*) spécialement dédié aux RCSF. L'objectif est de faire face aux problèmes liés aux faux acheminements de données.

Revenant au domaine des VANET, où une autre contrainte a été examinée par les auteurs de [140]. En fait, vu que la diffusion du message se fait par méthode d'inondation, les noeuds sont donc en perpétuel mouvement et les données sont traitées par les méthodes d'envoi et de réception rapides mais d'une façon très lente. Ainsi, à mesure que le nombre de noeuds augmente dans le réseau, une grande file d'attente de données à traiter est formée. L'augmentation du nombre de paquets de données entraîne une congestion du réseau qui augmentera le délai de transmission et diminuera le taux de livraison des paquets. De ce fait, le protocole de routage D-GPSR proposé utilise l'angle d'orientation des noeuds et la portée des noeuds afin de répondre à cette limitation de GPSR. Il choisit les noeuds qui sont à la limite de la portée du noeud émetteur comme noeud intermédiaire.

Cependant, en tenant compte de l'importance de l'impact des informations de localisation sur la décision du routage, GPSR+PRedict est conçu dans le but de garantir que chaque véhicule estime sa propre future position avant de la diffuser dans le voisinage. La future position estimée sera donc prise en considération afin de router les données intelligemment [141].

En revanche, durant notre recherche, nous n'avons pas trouvé une amélioration de GPSR dans le contexte multimédia. Assurer une QoE auprès des passagers tout en maintenant une bonne QoS du réseau est un concept qui n'a pas encore été adaptée au protocole GPSR.

### 3.5 Conclusion

Étant la clé de la gestion d'acheminement des données dans un réseau sans fil, les chercheurs valorisent le routage géographique en raison de sa forte attractivité prometteuse pour les réseaux VANET [116, 142, 143]. Plus particulièrement, le protocole de routage GPSR est un candidat géographique pertinent, qui a connu pleines d'améliorations dans plusieurs domaines. Dans ce chapitre, nous avons décrit le mécanisme de ce protocole, analysé ses points forts et ses inconvénients dans le but de mettre l'accent sur ses limites.

Certes, GPSR acquiert un nombre intéressant d'avantages, mais il reste toujours à répondre à certaines de ses limitations prioritaires. Avant de terminer, nous avons souligné des travaux antérieurs dans un détail relativement minime et clair.

Dans les chapitres qui suivent, nous allons présenter nos deux contributions qui visent à supporter la transmission vidéo et à promouvoir les performances des réseaux VANET.

---

**Sommaire**

4.1	Introduction . . . . .	<b>75</b>
4.2	Travaux antérieurs en vertu de la logique floue . . . . .	<b>76</b>
4.3	Système flou proposé pour GPSR . . . . .	<b>78</b>
4.3.1	Approche floue pour l'amélioration de GPSR . . . . .	78
4.3.2	Défis surmontés par rapport à la stabilité du réseau . . . . .	92
4.4	Évaluation des performances . . . . .	<b>93</b>
4.4.1	Paramètres de simulation . . . . .	93
4.4.2	Simulations et discussion par rapport à un milieu urbain sans obstacles . . . . .	94
4.4.3	Simulations et discussion par rapport à un milieu urbain avec obstacles . . . . .	100
4.5	Protocole FzGR vs variantes de GPSR tirées de la littérature . . . . .	<b>102</b>
4.6	Conclusion . . . . .	<b>103</b>

---

**4.1 Introduction**

Dans le cadre de la communication inter-véhicules, le défi le plus important est de proposer un protocole de routage rentable qui répond aux exigences de la QoS pour n'importe quel genre d'application [144]. En fait, le problème du routage est très délicat pour les concepteurs en raison des changements de topologie très fréquents. La difficulté réside également sur les changements des faits acquis dans le temps et qui sont causés par des obstacles tels que les arbres ou les bâtiments à titre d'exemple. Il convient de noter aussi que la portée de transmission de chaque véhicule participant à la communication pourrait être limitée à quelques centaines de mètres seulement selon le protocole de la couche MAC (par exemple IEEE 802.11p pour un réseau VANET [105]). Par conséquent, la transmission des données, qui doit se faire en temps réel depuis une source vers une destination à une distance assez importante, requiert un transfert saut à saut à travers plusieurs véhicules [145]. À cette fin, la conception du protocole doit être vigilante, en particulier dans le cas des applications multimédia qui tolèrent une meilleure performance.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter notre première contribution basée sur l'un des protocoles de routage géographique les plus prometteurs : GPSR que nous avons décrit en détail dans le chapitre 3. Comme rappel, le protocole GPSR permet au noeud

expéditeur de transmettre le paquet de données au prochain noeud voisin appartenant à sa portée radio. Ce voisin est choisi comme étant l'unique noeud ayant la plus petite distance par rapport à la destination finale. L'identifiant et la position de chaque noeud dans le réseau sont partagés périodiquement entre tous les noeuds directs (les noeuds se trouvant dans la même portée radio) par l'intermédiaire d'un paquet particulier appelé paquet de balise ou paquet HELLO. Ainsi, seul un paramètre  $d_{ij}$ , basé sur la position et qui représente la distance qui sépare chaque voisin de la destination finale, est pris en compte lors de la prise de décision d'acheminement. Cette décision à une seule mesure peut entraîner une dégradation significative de la performance du réseau. Notre variante améliorée de GPSR, définie par FzGR (*Fuzzy Geographical Routing* ou *Routage Géographique Flou*), adopte le concept de la logique floue [146] qui résout les défaillances de la métrique unique en utilisant un ensemble de ressources pour envoyer des paquets sur une liaison bien plus meilleure et stable en termes de qualité et qui tient compte non seulement de la distance  $d_{ij}$ , mais également d'autres mesures qualitatives.

Le protocole FzGR regroupe deux approches proposées. La première approche calcule le score de chaque lien unique (expéditeur-voisin) à partir de trois mesures de QoS pour appuyer le choix du prochain saut optimal, ce qui permet par la suite de répondre aux besoins des utilisateurs. Les trois mesures de qualité choisies et calculées à cette fin sont le délai, le débit et la taille du tampon puisqu'ils affectent de manière substantielle la QoS. La deuxième approche utilise la sortie pertinente et résultante de la première approche, et aussi la mesure principale  $d_{ij}$  sur laquelle GPSR se base afin de respecter les normes de ce protocole. La sortie de chaque approche est calculée par le contrôleur de logique floue CLF (*Fuzzy Logic Controller*) [1].

La contribution majeure de ce chapitre peut être résumée en deux parties. La première se base sur un premier bloc CLF qui calcule le coût du lien en fonction des trois paramètres de qualité que nous venons de mentionner. La deuxième se réfère à un deuxième bloc CLF qui combine le coût déjà calculé par le premier bloc et la distance  $d_{ij}$  afin d'obtenir un poids final pour chaque lien. À partir de notre étude, le CLF est adapté pour transmettre les paquets de manière plus efficace. Par conséquent, la QoE est assurée tout en maintenant une bonne QoS.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. Dans la section 4.2, nous allons préciser l'importance de la logique floue dans le monde scientifique en générale et vis-à-vis du routage dans l'environnement VANET en particulier. Dans la section 4.3, nous allons décrire en détail notre propre approche de routage. L'évaluation des performances de notre variante ainsi que du protocole GPSR sera présentée dans la section 4.4.2. Enfin, dans la section 4.6, nous allons donner une synthèse générale pour clore ce chapitre.

## 4.2 Travaux antérieurs en vertu de la logique floue

Un nombre considérable de chercheurs ont activement exploré la puissance avancée du mécanisme de la logique floue pour différentes problématiques [146]. En effet, la logique floue représente un modèle largement reconnu par sa précision et sa rapidité de calcul des résultats. Ce modèle révèle un dispositif important pour résoudre un problème complexe, d'où l'efficacité éprouvée dans de nombreux sujets où la description d'un système est

délicate et très difficile [147, 25]. Dans notre travail, puisque VANET est une technologie puissante où les véhicules connaissent une mobilité très élevée, il faut donc certainement un mécanisme simple et agile pour pouvoir prendre une décision de routage rapide et par la suite pouvoir répondre en temps réel aux besoins des usagers de la route [1]. C'est pourquoi cette solution semble être le choix le plus approprié pour calculer la mesure pertinente sur laquelle FzGR va se baser pour acheminer les paquets en fonction de diverses mesures de QoS.

Que ce soit dans les réseaux VANET, MANET ou même RCSF, la logique floue s'est imposée. En effet, la performance de divers protocoles de routage existants a été améliorée en prenant en considération des stratégies floues efficaces.

En 2008, les auteurs de [148] ont utilisé un système de logique floue dans le contexte des réseaux RCSF. Grâce auquel chaque noeud va pouvoir déterminer sa capacité à transférer des données en fonction de son niveau d'énergie, sa distance et sa charge de trafic dans le but de maximiser la durée de vie du réseau. Les résultats de simulation ont montré que la durée de vie du réseau a été effectivement améliorée en faveur de leur nouvelle variante RAUFLS (*Routing Analysis Using Fuzzy Logic Systems*). Le système de logique flou permet donc la sélection fiable du noeud apte à transférer les paquets vers la destination finale.

En 2011, un autre protocole a été développé par les chercheurs et qu'ils ont appelé FAST (*Fuzzy-Assisted Social-based routing*). Effectivement, les auteurs de [149] ont proposé un protocole social à assistance floue pour les réseaux VANET. Le protocole FAST se base pleinement du comportement social des humains pour la prise de décisions optimales et sécurisées dans les zones urbaines.

Deux années plus tard, en 2013, une autre démarche floue a été dédiée aux réseaux VANET. Les auteurs de [150] ont proposé un protocole de routage Q-learning à contraintes floues, appelé PFQ-AODV. Ce protocole utilise, d'une part, la logique floue afin d'évaluer un lien, et d'autre part, il utilise le Q-learning pour sélectionner un itinéraire fiable. Le protocole PFQ-AODV peut être réglé pour être utilisé dans différents scénarios en modifiant les fonctions d'appartenance floues et les règles floues. Il est indépendant des couches inférieures et ne nécessite pas de GPS. Cette variante de AODV fournit également une solution flexible, portable et adaptée au routage.

Dans le contexte des réseaux MANET, le protocole DPB-GPSR (*Dynamic Packet Beaconing for GPSR*) a été conçu en 2015 par les auteurs de [137]. La stratégie de balisage a été adaptée pour avoir une maintenance précise et plus récente sur les positions figurantes dans la liste des voisins, ce qui va améliorer sans aucun doute le routage. L'optimisation est basée sur la corrélation entre NMS (vitesse de déplacement du noeud), NoNN (nombre de noeuds voisins) et BPIT (intervalle de balayage des paquets). L'étude a montré l'efficacité du mécanisme flou dans l'amélioration de la performance globale du protocole GPSR en termes de la surcharge des paquets de balisage, de retard, de saut non optimal et de fausses informations sur la position des noeuds erronés.

Dans la même année, les auteurs de [151] ont proposé le protocole FLBCS (*Fuzzy Logic based Clustering Strategy*) pour les réseaux VANET. Ce nouvel algorithme de sélection de l'entête du *cluster* basé sur la logique floue est capable de combiner les paramètres de direction, de vitesse, d'accélération et de distance dans le but de sélectionner le véhicule

le plus approprié en tant que tête du *cluster*. L'algorithme proposé satisfait à la fois les véhicules à grande et à basse vitesse sur une autoroute à voies multiples.

En 2017, les auteurs de [152] ont conçu un protocole qui peut assurer le stockage des données dans les réseaux VANET. Le protocole tient compte du débit, de la vitesse du véhicule et de la bande passante en utilisant : d'un côté, la logique floue pour effectuer une évaluation à court terme et d'un autre côté, l'algorithme Q-learning pour considérer l'efficacité à long terme. Le protocole emploie également une approche de transfert par *cluster* pour collecter les données du véhicule vers le noeud du support de données.

Par ailleurs, toujours dans l'année 2017, le protocole AMHDS II a été élaboré par les auteurs de [153] pour les réseaux mobiles hétérogènes. La logique floue a été utilisée dans le but d'améliorer l'intelligence du système de décision de transfert (*Handover Decision System : HDS*). Les auteurs ont utilisé une philosophie de conception modulaire et adaptative afin de pouvoir prendre en compte différents types de trafic. La conception proposée a produit un temps d'exécution inférieur de l'algorithme et a amélioré en même temps la capacité de sélection du réseau.

Dans la même année 2017 mais dans un contexte MANET, FBNTT DYMO a été implémenté par les auteurs de [154]. Ce protocole a réussi à générer des valeurs optimales NTT (*Node Traversal Time*) à l'aide du concept flou et à obtenir de meilleurs résultats avec une valeur NTT dynamique. À noter aussi que le réglage précis des paramètres a augmenté les performances du protocole de routage.

En revanche, au cours de nos recherches, nous n'avons pas trouvé un nombre significatif de travaux qui combinent entre le protocole GPSR et la logique floue afin de répondre aux besoins des applications multimédia, et par la suite améliorer la QoE tout en maintenant une bonne QoS dans un réseau véhiculaire. La nouveauté de notre travail s'inspire de l'étude réalisée par les auteurs de [147]. Le principe est de sélectionner le meilleur prochain expéditeur à l'aide d'une approche floue multi-critères. Nous affirmons qu'il s'agit du premier travail qui développe une métrique de routage à QoS et qui couvre le système de logique flou [146] adapté au protocole GPSR pour supporter la transmission multimédia sur les réseaux VANET.

### 4.3 Système flou proposé pour GPSR

Tel que indiqué plutôt, le système que nous proposons nécessite des informations sur la QoS des liens directs pour pouvoir prendre une décision de routage appropriée. Certains paramètres d'entrée pour l'algorithme proposé sont obtenus par un calcul intégré au protocole GPSR. Ainsi, nous bénéficions du standard GPSR pour faciliter l'obtention des informations nécessaires sur les connexions entre les noeuds participants. En exploitant les spécifications et les caractéristiques de ce standard, les services sont obtenus sans interruption avec des qualités de service répondant aux besoins de l'utilisateur.

#### 4.3.1 Approche floue pour l'amélioration de GPSR

Fournir un maximum d'informations dans un délai tolérable est l'exigence primordiale des applications VANET. Par conséquent, tout événement sur la route peut être évité

à l'avance. D'autre part, par rapport au flux vidéo, la convivialité, la disponibilité et l'intégrité du service représentent les principales exigences dont ont besoin les conducteurs ou les passagers. D'où le concept de la QoE qui comprend des aspects non techniques qui influencent directement la perception de l'utilisateur pour se procurer ces exigences.

Le protocole de routage GPSR utilise uniquement une distance  $d_{ij}$  comme mesure de routage, ce qui peut conduire à la sélection d'un prochain noeud voisin erroné qui ne supporte pas les propriétés de QoS. Un mécanisme de routage efficace nécessite alors la sélection de véhicules qui tiennent compte de nombreuses mesures de QoS. Cependant, pour décrire et ensuite résoudre ce problème, il n'existe pas de modèle mathématique bien précis [147].

Dans notre travail, puisque VANET est une technologie puissante où les véhicules connaissent une mobilité très élevée, les méthodes très simples et agiles pour prendre des décisions rapides deviennent une nécessité. De ce fait, le système de logique floue [146] qui est largement reconnu par sa précision et sa rapidité de calcul des résultats semble être la méthode la plus adéquate pour notre problème. Ce modèle nous procurera une métrique cohérente à partir de différentes métriques. Il met également à disposition un périphérique professionnel pour résoudre un problème à contraintes multiples [147, 155].

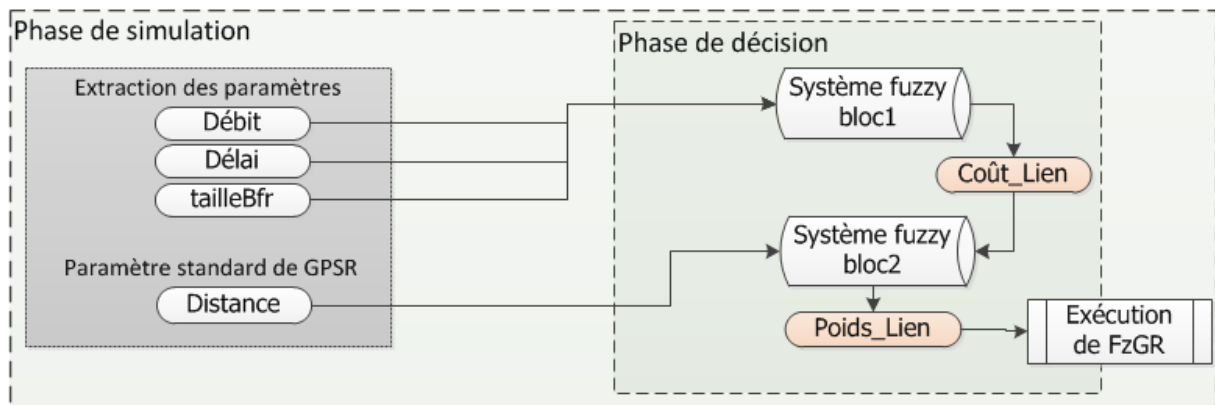


FIGURE 4.1 – Modèle général du système proposé

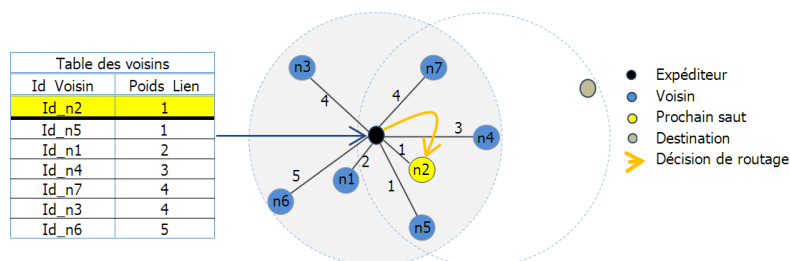


FIGURE 4.2 – Sélection du meilleur prochain saut basée sur le poids du lien

Nous utilisons deux systèmes de logique floue pour calculer le poids de chaque lien entre l'expéditeur et ses voisins. Les paramètres d'entrée considérés par le premier CLF proposé sont le délai, le débit et la taille du tampon (tailleBfr). En conséquence, chaque noeud du réseau peut générer un graphe de coûts. Ensuite, puisque le concept GPSR prend en compte la distance  $d_{ij}$  pour choisir le meilleur prochain saut, les paramètres d'entrée

TABLE 4.1 – Algorithme de déclaration de la mesure Poids\_Lien

---

```

1 : //Variables publics
2 : N ← [nr1, nr2, nr3,...nri] ∈ Range(Expediteur)

3 : maxDélai      ← MAX_Delai(N)
4 : maxDébit      ← MAX_Debit(N)
5 : maxTaillebfr  ← MAX_TailleBfr(N)
6 : maxDistance   ← MAX_Distance(N, destx, desty)

7 : Function getScore(nri, destx, desty)
8 :     dl ← nri.delai
9 :     db ← nri.debit
10 :    tb ← nri.tailleBfr
11 :    dist ← nri.distance(destx,desty)

12 :    Nd ← dl/maxDélai
13 :    Ndb ← db/maxDébit
14 :    Ntb ← tb/maxTaillebfr
15 :    Ndist ← dist/maxDistance

16 :    CoutLieni ← FuzzyCout(Nd, Ndb, Ntb)
17 :    PoidsLieni ← FuzzyPoids( CoutLieni, Ndist)

18 :    Return PoidsLieni
19 : End Function

20 : Function fuzzyNextHop(destx,desty)
21 :     minScore ← getscore(nr1,destx,desty)
22 :     nextHop ← nr1
23 :     For each nri ∈ N
24 :         score ← getscore(nri, destx, desty)
25 :         if (score < minScore)
26 :             minScore ←= score
27 :             nextHop ← nri
28 :         End if
29 :     End for
30 : Return nextHop
31 : End Function

```

---

considérés par le deuxième CLF proposé sont le coût de liaison déjà calculé et la mesure  $d_{ij}$ . À partir de cette deuxième méthode, un graphe de poids de lien est établi pour chaque noeud. La figure 4.1 et le tableau 4.1 résument clairement notre modèle général, tandis que la figure 4.2 illustre le processus de sélection du prochain meilleur noeud (noeud de

couleur jaune) choisi par l'expéditeur (noeud de couleur noir) selon notre proposition.

Nous décrivons dans ce qui suit comment nous procédons pour calculer les trois paramètres de QoS figurants dans l'algorithme du tableau 4.1, notamment  $nr_i$ .délai,  $nr_i$ .débit et  $nr_i$ .tailleBfr.

#### 4.3.1.1 Calcul des paramètres d'entrée pour le premier bloc CLF

Les mesures  $nr_i$ .délai,  $nr_i$ .débit et  $nr_i$ .tailleBfr sont calculées en temps réel durant la simulation.

##### a. Calcul du délai du lien

La mesure  $nr_i$ .délai représente le délai entre l'expéditeur et son  $nr_i$ . Pour calculer la métrique du délai pour chaque liaison entre un noeud et son voisin, nous avons supposé que les noeuds du réseau sont synchronisés. Ainsi, le délai est calculé comme suit : chaque noeud inclut dans le message HELLO l'instant *Temps\_Envoie* de sa création. Pendant la phase de découverte des voisins et lorsqu'un message HELLO est reçu à l'instant *Temps\_Reception*, le délai est alors calculé par la différence entre le temps de réception et celui de l'envoi (voir l'équation 4.1).

$$DelaiLien = Temps\_Reception - Temps\_Envoie \quad (4.1)$$

##### b. Calcul du débit du lien

Le débit effectif du lien peut être calculé en utilisant les mesures capturées pendant le temps requis pour transférer des paquets de données. Ainsi,  $nr_i$ .débit exprime la bande passante de transmission de données réelle sur le lien entre l'expéditeur et son  $nr_i$ . Il est défini comme indiqué dans l'équation 4.2.

$$DebitLien = \frac{(TaillePaquet_1 + \dots + TaillePaquet_n)}{(TempsTrans_1 + \dots + TempsTrans_n)} \quad (4.2)$$

Où, *TempsTrans* est le temps effectif requis pour transférer un paquet de données.

Le débit du lien est calculé au niveau de chaque noeud, puis transféré via le paquet HELLO vers les voisins concernés. Le noeud expéditeur reçoit ainsi l'information du débit du lien de la part de chaque voisin lié à lui.

##### c. Calcul de la taille du tampon du voisin

La tailleBfr représente la somme des tailles des paquets de données en attente d'être traité par un noeud à un moment donné (voir équation 4.3).

$$TailleBfrLien = TaillePaquet_1 + \dots + TaillePaquet_n = \Sigma TaillePaquet_i, i \in [1, n] \quad (4.3)$$

Où,  $TaillePaquet_i$  est la taille du paquet de données d'indice  $i$  traité par un noeud.

La métrique tailleBfr est calculée par chaque noeud du réseau VANET et elle est transférée via les paquets HELLO à tous les noeuds voisins du noeud concerné. À chaque réception d'un nouveau paquet, la taille de ce dernier sera ajoutée à tailleBfr. À l'inverse, lorsqu'un paquet est traité et envoyé, sa taille est soustraite de tailleBfr.

Après avoir donné une idée générale sur notre approche floue, les sous-sections suivantes décrivent en détail les concepts flous adoptés et les composants nécessaires pour construire le CLF afin de calculer les coûts et poids des liens.

#### 4.3.1.2 Théories du contrôle flou et des ensembles flous

La théorie du contrôle flou bénéficie des contrôles intelligents car elle adopte une méthode de contrôle adaptatif non linéaire basée sur l'intelligence artificielle (IA) [156]. Les principaux avantages de la théorie des ensembles flous, comme mentionné dans [157], résident sur l'idée des règles floues ou base de connaissances contenant un ensemble de règles SI-ALORS sous forme d'instructions conditionnelles floues. Une règle floue est composée de l'antécédent et du conséquent. Ces deux derniers sont des propositions contenant des variables linguistiques en vue de résoudre des problèmes complexes.

Cette théorie ne nécessite aucun schéma mathématique détaillé. La théorie des ensembles flous a été introduite dans [158]. Elle peut représenter des données vagues ou ambiguës sous une forme raisonnable et logique. C'est la raison pour laquelle elle a été utilisée comme moteur de modélisation pour de nombreux systèmes complexes qui peuvent être gérés par des humains, mais ils sont difficiles à définir objectivement, tout comme notre cas pour l'amélioration de GPSR.

Par ailleurs, le rôle d'un ensemble flou qui fait son succès, est le fait d'affecter aux objets des niveaux d'appartenance entre 0 et 1 selon une fonction d'appartenance (FA) particulière (*Membership Function*). Dans [156, 159], les auteurs fournissent une explication approfondie pour la plupart des FA existantes. Aussi, les auteurs de [156] ont évalué différents types de FA, à savoir, les types triangulaire, trapézoïdal, gaussien, en cloche, sigmoïdal et polynomial dans le cadre du moteur d'inférence. En fait, ils ont mis en place le contrôle flou avec différents FA sous une forme symétrique et à une répartition égale. Ils ont utilisé le même type de FA pour les ensembles d'entrée et de sortie. Les résultats indiquent que les FA triangulaires et trapézoïdales donnent les meilleures performances. Bien que leur étude appuie ces deux FA, mais conformément à [160], les chercheurs ont indiqué que l'efficacité d'une FA particulière est liée au problème proposé.

#### 4.3.1.3 Nombres flous : Gaussian, S-shaped et Z-shaped

Pour représenter l'importance relative floue dans notre étude, les nombres flous gaussiens (GFN), les nombres flous S-shaped (SsFN) et les nombres flous Z-shaped (ZsFN) ont été principalement choisis en raison de leur fluidité et de leur vitesse de calcul. En fait, comme les nombres flous triangulaires ou trapézoïdaux, GFN, SsFN et ZsFN sont également très populaires dans la littérature logique floue. Une GFN est définie par deux nombres exprimés par  $\zeta_i$  et  $\sigma_i$  qui représentent respectivement le centre et la largeur du  $i^e$  ensemble flou  $GFN_i$  (voir figure 4.3). GFN est décrit par l'équation 4.4. Les distinctions de cas de SsFN et ZsFN sont spécifiées successivement dans l'équation 4.5 et l'équation 4.6.

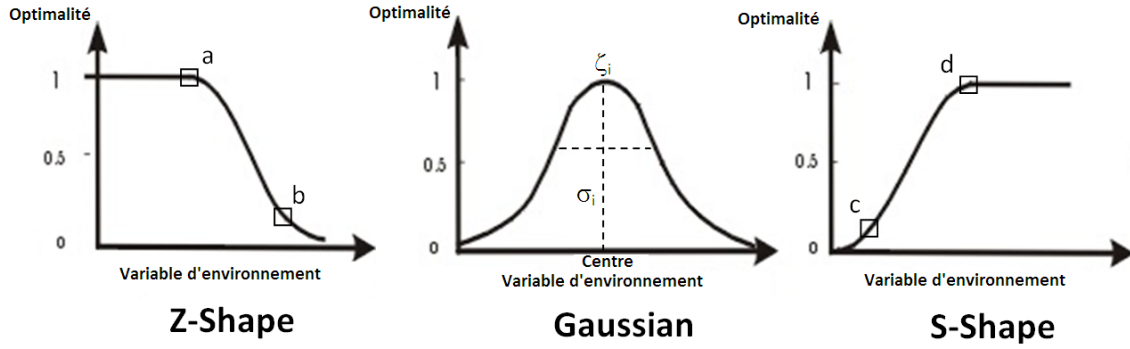


FIGURE 4.3 – Nombres flous : Z-shaped, Gaussian et S-shaped

$$GFN(x; \sigma, \zeta) = \begin{cases} \text{Exp}^{-\frac{(x-\zeta)^2}{2\sigma^2}}, & \frac{(x-\zeta)^2}{\sigma^2} \in \mathfrak{R} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$ZsFN(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (4.5)$$

$$SsFN(x; c, d) = \begin{cases} 1, & x \geq d \\ 2 \left( \frac{x-c}{d-c} \right)^2, & c \leq x \leq \frac{c+d}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-c}{d-c} \right)^2, & \frac{c+d}{2} < x < d \\ 0, & x \leq c \end{cases} \quad (4.6)$$

Le tableau 4.2 reprend les différentes étapes sur lesquelles la logique floue est basée par ordre d'exécution.

TABLE 4.2 – Éléments constitutionnels du CLF [1]

Éléments	Descriptions
Fuzzification	Dépend de l'entrée des FA. Convertit les valeurs d'entrée nettes en ensembles d'entrée flous nécessaires pour le moteur d'inférence.
Base des règles	Contient un groupe de règles SI-ALORS flous basées sur les valeurs flous pour calculer la métrique de sortie.
Moteur d'inférence	Dérive et déduit des décisions depuis les règles flous SI-ALORS. Modifie les ensembles d'entrées flous reçues du Fuzzifier en des ensembles de sorties flous.
Deffuzzification	Convertit et renvoie une valeur nette basée sur la fonction FA de sortie prédéfinie.

## 4.3.1.4 CLF pour calculer le coût du lien « Coût\_Lien »

## a. Fuzzification des paramètres d'entrée : délai, débit et taille du tampon

Notre modèle CLF, comme le montre la Fig. 4.1, reçoit trois entrées qui sont le délai, le débit et la taille du tampon (tailleBfr) par rapport à chaque saut, et donne en sortie le coût correspondant. Les ensembles flous de ces trois paramètres d'entrée ont les noms linguistiques suivants : faible (L), moyen (M) et élevé (H) (voir la Fig. 4.4). La table 4.3 montre l'intervalle alloué aux ensembles flous ainsi que les FA des trois paramètres d'entrée.

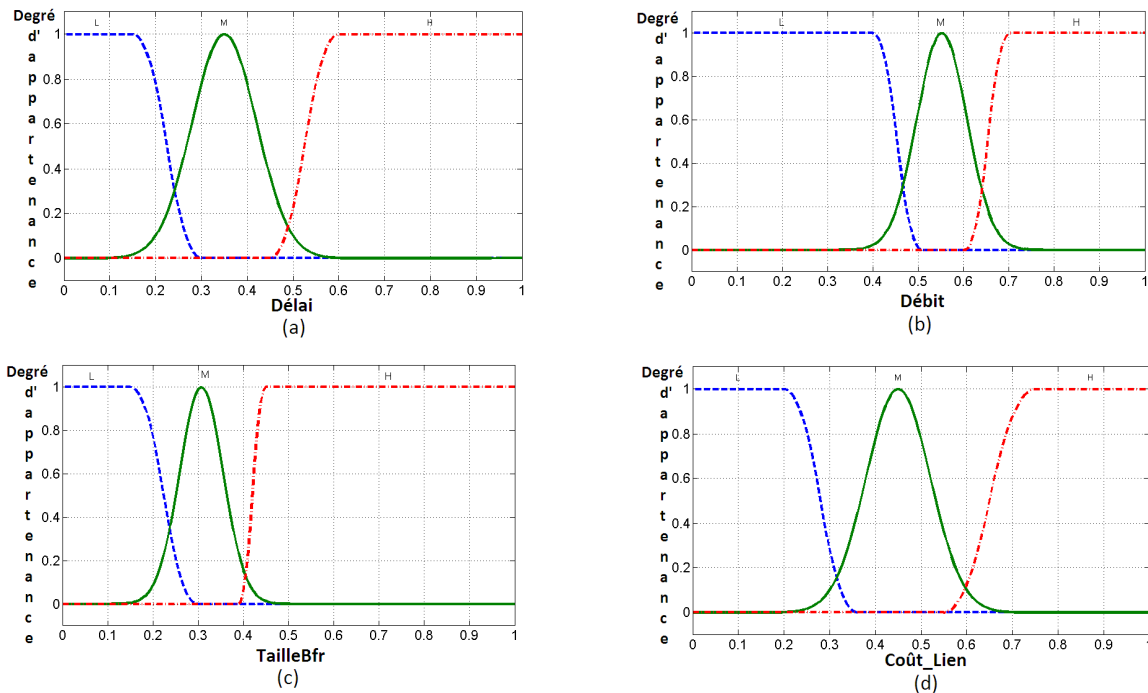


FIGURE 4.4 – Fonctions d'appartenance ; pour les ensembles d'entrée : (a) délai, (b) débit et (c) tailleBfr, pour l'ensemble de sortie (d) Coût\_Lien

TABLE 4.3 – Ensembles flous pour les paramètres d'entrée : délai, débit et tailleBfr

Intervalle du délai	Intervalle du débit	Intervalle tailleBfr	Ensembles flous	Fonctions d'appartenance
0-0.3	0-0.5	0-0.3	L	ZsFN
0.15-0.55	0.4-0.7	0.15-0.45	M	GFN
0.45-1	0.6-1	0.4-1	H	SsFN

Dans l'algorithme 4.1 du coût de lien, les variables maxDélai, maxDébit et max-TailleBfr représentent les valeurs maximales de chaque métrique d'entrée. Par conséquent, pour chaque lien « expéditeur-voisin », les entrées normalisées, c'est-à-dire  $N_d$ ,  $N_{db}$  et

Ntb, sont calculées. Ces dernières sont utilisées comme paramètres d'entrée de la fonction floue du coût pour affecter par la suite le coût approprié à chaque saut « expéditeur-voisin ». Les métriques à QoS de lien décrits précédemment sont calculées par chaque noeud du réseau VANET, et elles sont diffusées à travers les paquets HELLO vers tous les noeuds voisins du noeud concerné.

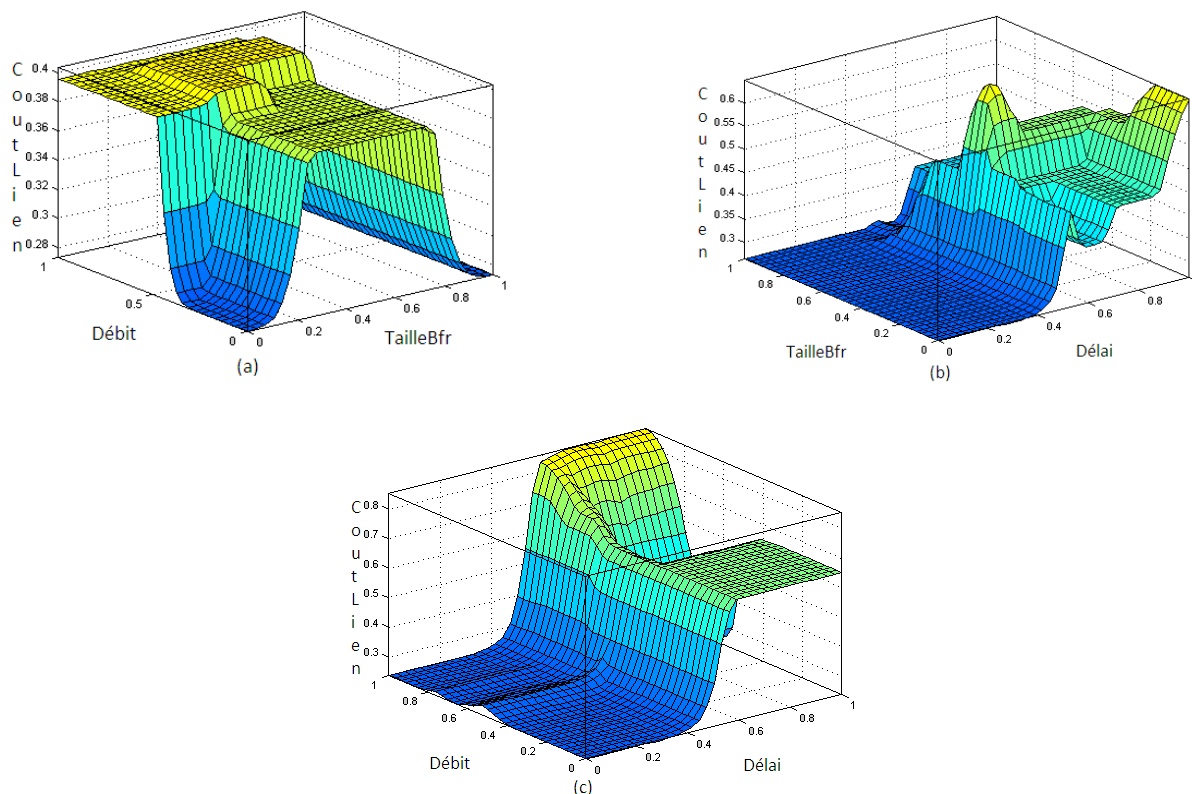


FIGURE 4.5 – Vue de surface de la mesure de sortie Coût\_Lien selon un (a) délai constant, (b) débit constant et (c) tailleBfr constant

*b. Fuzzification du paramètre de sortie : Coût\_Lien*

Les ensembles flous proposés pour le paramètre de sortie Coût\_Lien ont les noms linguistiques suivants : faible (L), moyen (M) et élevé (H). Le tableau 4.4 présente les intervalles désignés pour les ensembles flous et les FA associées à la sortie. Les valeurs floues du Coût\_Lien sont entre 0 et 1. Les FA sont nommées, respectivement, ZsFN, GFN et SsFN.

TABLE 4.4 – Ensembles flous pour le paramètre de sortie Coût\_Lien

Intervalle du Coût_Lien	Ensembles flous	FA
0-0.35	L	ZsFN
0.25-0.65	M	GFN
0.55-1	H	SsFN

### c. Règles et inférences floues

Sur la base des valeurs floues des trois entrées, le véhicule emploie les règles SI-ALORS proposées dans le tableau 4.5 et qui peuvent être utilisées par inférence floue pour définir les ensembles d'entrée flous (tableau 4.3) en des ensembles de sortie flous (tableau 4.4).

L'élément responsable de la défuzzification rassemble l'ensemble flou dans une seule valeur. La méthode de Mamdani [161], qui a été utilisée dans plusieurs documents de recherche [162, 163], est l'une des méthodes de défuzzification les plus attractives. En effet, cette méthode de Mamdani a été introduite en 1974 par le chercheur MAMDANI en établissant la première application industrielle de la logique floue. Le chercheur MAMDANI a conçu la régulation floue d'une chaudière à vapeur en utilisant la commande floue. Par la suite, à partir de l'année 1985, la logique floue a vite trouvé sa place dans la recherche japonaise grâce au chercheur SUGNEO. Les entreprises de ce pays assimilèrent l'intérêt que représente cette méthode que ce soit du point de vue technique ou commercial. Parmi les avantages de Mamdani, nous citons : la facilité d'implantation, la solution des problèmes multi-variables complexes, la robustesse vis à vis des incertitudes, et la possibilité d'intégration du savoir de l'expert.

La méthode Mamdani génère une règle floue qui donne comme résultat un ensemble flou. Cette règle s'écrit sous la forme suivante :

$$\text{SI } x_1 \text{ est } A_1^i \text{ ET } \dots \text{ ET } x_p \text{ est } A_p^i \text{ ALORS } y_1 \text{ est } C_1^i \text{ ET } \dots \text{ ET } y_q \text{ est } C_q^i$$

avec : A et C sont des ensembles flous qui définissent le partitionnement des espaces d'entrée et de sortie.

Par exemple, dans le tableau 4.5, on peut observer que la sortie M est un jeu dominant dans les jeux de liens de sortie. Cette sortie est choisie pour s'assurer que le noeud ne choisira pas un chemin de mauvaise qualité. Selon la règle numéro 7, si le délai est L, le débit est H et la taille du tampon est également L, alors le Coût\_Lien sera L. Dans ce cas, nous pouvons dire que le lien a une bonne qualité et il générera de bons résultats, sinon le lien est de faible qualité (voir la figure 4.6).

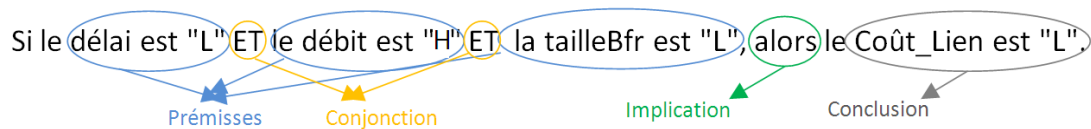


FIGURE 4.6 – Base des règles floues

En conséquence, la figure 4.4 illustre respectivement les FA du délai, du débit et celles de tailleBfr conformément à GFN, ZsFN et SsFN. La figure 4.5 montre la vue de surface de la sortie Coût\_Lien en considérant respectivement des délais constants, des débits constants et des tailleBfr également constants du CLF proposé.

En fait, avec ce premier bloc CLF, nous avons considéré la QoS du lien pour trouver les meilleurs liens. Cependant, pour garder l'originalité du protocole de base, la mesure de la distance doit être ajoutée. Dans le paragraphe suivant, nous présentons le deuxième bloc CLF pour la métrique Poids\_Lien afin de préserver le principe du GPSR classique.

TABLE 4.5 – Règles SI-ALORS pour le calcul de la mesure Coût\_Lien

Règle	délat	débit	tailleBfr	Coût_Lien	Règle	délat	débit	tailleBfr	Coût_Lien	Règle	délat	débit	tailleBfr	Coût_Lien
1	L	L	L	M	10	M	L	L	M	19	H	L	L	H
2	L	L	M	M	11	M	L	M	H	20	H	L	M	H
3	L	L	H	H	12	M	L	H	H	21	H	L	H	H
4	L	M	L	L	13	M	M	L	M	22	H	M	L	M
5	L	M	M	M	14	M	M	M	M	23	H	M	M	H
6	L	M	H	H	15	M	M	H	H	24	H	M	H	H
7	L	H	L	L	16	M	H	L	L	25	H	H	L	M
8	L	H	M	L	17	M	H	M	M	26	H	H	M	M
9	L	H	H	H	18	M	H	H	H	27	H	H	H	H

#### 4.3.1.5 CLF pour calculer le poids du lien « Poids\_Lien »

Après avoir calculé le coût de chaque lien ( $n_k \leftrightarrow nr_i$ ) en utilisant les paramètres de QoS, nous devons maintenant l'utiliser auprès de la distance afin de répondre aux normes du protocole GPSR. Notre objectif est de sélectionner le prochain noeud le plus proche de la destination mais qui ne causera pas de pertes significatives avec des retards remarquables. À cette fin, nous avons développé un deuxième CLF qui complète le premier pour calculer les poids définitifs des liens.

Dans l'algorithme du calcul du poids, la variable maxDistance calcule la valeur maximale de la distance. Cette valeur est utilisée afin de calculer pour chaque lien direct « expéditeur-voisin » la distance normalisée Ndist pour la distance. La métrique Ndist et la métrique Coût\_Lien déjà calculée sont utilisées comme paramètres d'entrée de la fonction floue du poids pour générer le poids final de chaque lien. Ainsi, les voisins inadéquats selon les paramètres de coût et de distance seront ignorés.

##### a. Fuzzification des paramètres d'entrée : Coût\_Lien et distance

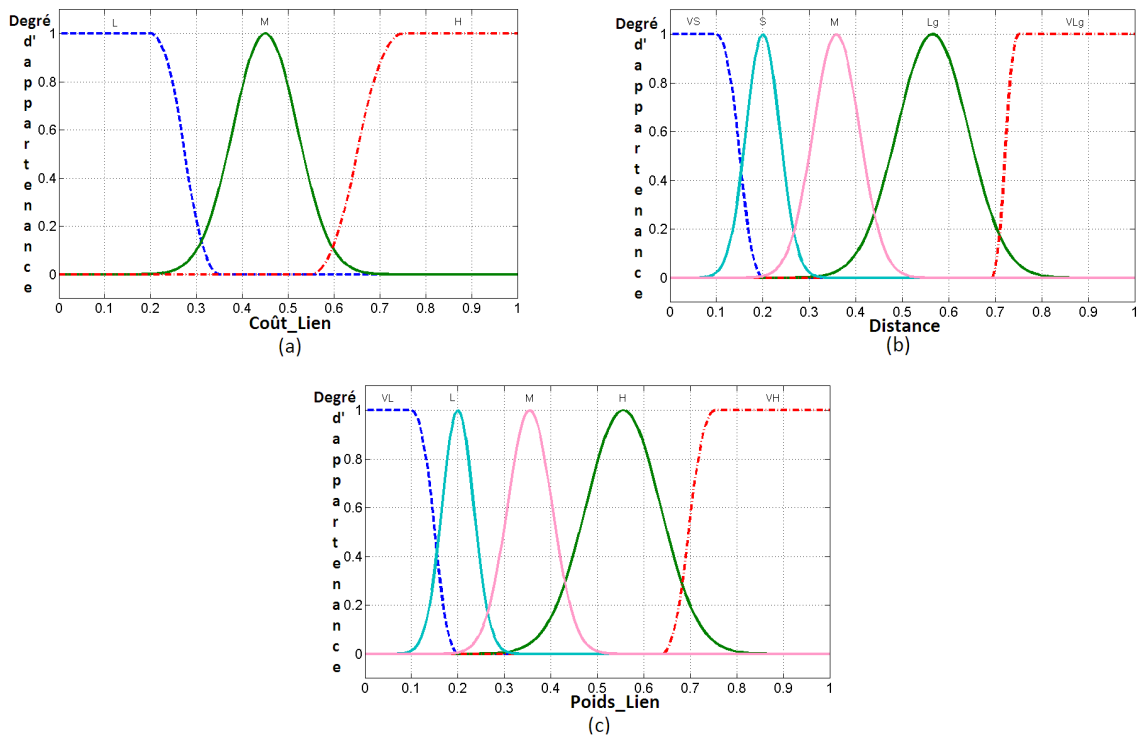


FIGURE 4.7 – Fonctions d'appartenance ; pour les ensembles d'entrée (a) Coût\_Lien et (b) distance ; pour l'ensemble de sortie (c) Poids\_Lien

Les ensembles flous pour ces deux paramètres d'entrée ont les noms linguistiques suivants : très court (VS), court (S), moyen (M), long (LG) et très long (VLG). En outre, les tableaux 4.4 et 4.6 montrent l'affectation des plages, des ensembles flous et des FA pour les paramètres d'entrée.

TABLE 4.6 – Ensembles flous pour le paramètre d'entrée : distance

Intervalle	Ensembles flous	FA
0-0.2	VS	ZsFN
0.1-0.3	S	GFN
0.2-0.5	M	GFN
0.3-0.8	LG	GFN
0.7-1	VLG	SsFN

*b. Fuzzification du paramètre de sortie : Poids\_Lien*

Les ensembles flous proposés pour le paramètre de sortie Poids\_Lien ont les variables linguistiques figurant dans le tableau 4.7.

TABLE 4.7 – Ensembles flous pour le paramètre de sortie : Poids\_Lien

Intervalle	Ensembles flous	FA
0-0.2	VL	ZsFN
0.1-0.3	L	GFN
0.2-0.5	M	GFN
0.3-0.8	H	GFN
0.65-1	VH	SsFN

*c. Règles et inférences floues*

Le tableau 4.8 définit les règles SI-ALORS. Sur la base des valeurs floues des deux entrées, le véhicule utilise ces règles pour calculer la métrique du poids de la liaison. Cette sortie est prise en compte pour imposer au noeud de ne choisir aucun voisin ayant un mauvais poids. Selon la règle numéro 5, si le Coût\_Lien est L et la distance est VLG, nous voulons alors que le Poids\_Lien soit H, donc le lien correspondant ne sera pas considéré. La figure 4.8 présente une illustration de ces règles depuis l'outil MATLAB.

Il faut noter que les intervalles flous et les règles floues, figurant dans les deux tableaux 4.3 et 4.8, ont été déduits à partir de notre logique et comment nous voulons que les critères de QoS soient en temps réel afin de pouvoir atteindre une performance du réseau souhaité. En fait, chaque paramètre d'entrée a un degré d'importance selon notre logique. Étant donné que la distance est le paramètre de base de GPSR, elle demeure donc plus prioritaire. En ce qui concerne les trois entrées calculées, la mesure tailleBfr vient en second lieu, suivie du débit puis du délai. Notre objectif est de sélectionner les meilleurs noeuds qui doivent assurer la continuité du flux lors de la communication inter-véhicules. Par ailleurs, notre logique a été également soutenue par nos simulations.

TABLE 4.8 – Règles SI-ALORS pour le calcul de la mesure Poids\_Lien

Règle	Coût_Lien	distance	Poids_Lien
1	L	VS	VL
2	L	S	VL
3	L	M	L
4	L	LG	M
5	L	VLG	H
6	M	VS	L
7	M	S	L
8	M	M	M
9	M	LG	H
10	M	VLG	VH
11	H	VS	H
12	H	S	H
13	H	M	H
14	H	LG	VH
15	H	VLG	VH

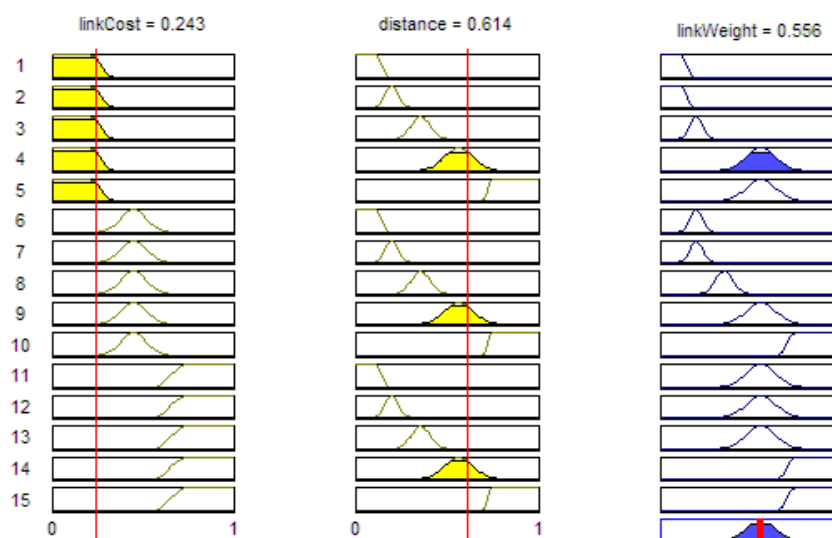


FIGURE 4.8 – Illustration des règles SI-ALORS depuis MATLAB

#### 4.3.1.6 Choix des intervalles flous

Le choix des intervalles flous a été soutenu par nos tests de simulation. En effet, nous avons d'abord tourné la simulation en fonction de quelques exemples de règles et d'intervalles qui ont conduit par la suite à un échec. En fin de compte, nous avons trouvé des intervalles favorables qui nous ont permis d'obtenir de bons résultats en termes de la QoS et de la QoE (voir Table 4.9).

Si l'on revient au graphe du délai du lien de la Fig 4.4, on peut dire que lorsque la valeur 0.3 est dépassée, le délai devient très important surtout pour une activité de *streaming* où le temps est un facteur essentiel. Cependant, si nous prenons le cas de la valeur 0.35, le

TABLE 4.9 – Étude paramétrique : variation des plages

Simulation en utilisant des séquences de <i>Foreman</i> , avec 100 véhicules et 50 communications de fond de type CBR						
Cas	Métrique	Intervalles [L ; M ; H] / [VS ; S ; M ; Lg ; VLg]	PDR (%)	Délai (ms)	Débit (kbps)	Surcharge
A	Délai	[0-0.35 ; 0.35-0.7 ; 0.7-1]	69.04	4.93	256.73	0.66
	Débit	[0-0.35 ; 0.35-0.7 ; 0.7-1]				
	TailleBfr	[0-0.35 ; 0.35-0.7 ; 0.7-1]				
	Distance	[0-0.35 ; 0.35-0.7 ; 0.7-1]				
B	Délai	[0-0.5 ; 0.25-0.75 ; 0.5-1]	61.27	6.14	224.00	0.70
	Débit	[0-0.5 ; 0.25-0.75 ; 0.5-1]				
	TailleBfr	[0-0.5 ; 0.25-0.75 ; 0.5-1]				
	Distance	[0-0.5 ; 0.25-0.75 ; 0.5-1]				
C	Délai	[0-0.6 ; 0.4-1 ; 0.6-1]	57.33	6.79	182.40	1.52
	Débit	[0-0.6 ; 0.4-0.9 ; 0.6-1]				
	TailleBfr	[0-0.5 ; 0.2-0.8 ; 0.5-1]				
	Distance	[0-0.2 ; 0.1-0.3 ; 0.2-0.5 ; 0.2-0.7 ; 0.4-1]				
D	Délai	[0-0.65 ; 0.5-8 ; 0.65-1]	25.41	5.36	67.91	2.84
	Débit	[0-0.65 ; 0.5-0.8 ; 0.65-1]				
	TailleBfr	[0-0.6 ; 0.3-0.9 ; 0.6-1]				
	Distance	[0-0.35 ; 0.25-0.45 ; 0.35-0.65 ; 0.55-0.75 ; 0.65-1]				
E	Délai	[0-0.3 ; 0.15-0.55 ; 0.45-1]	82.36	4.30	410.11	0.31
	Débit	[0-0.5 ; 0.4-0.7 ; 0.6-1]				
	TailleBfr	[0-0.3 ; 0.15-0.45 ; 0.4-1]				
	Distance	[0-0.2 ; 0.1-0.3 ; 0.2-0.5 ; 0.3-0.8 ; 0.7-1]				

retard vient au milieu et une fois qu'il devient supérieur, la vidéo commence à prendre un peu de retard produisant des conséquences négatives à la réception. En ce qui concerne le graphique du débit sur la même figure, lorsque la valeur est inférieure à 0.6, alors le nombre de paquets transmis occupe considérablement le lien ce qui influence la capacité à gérer plus de paquets et ainsi le temps de transmission. Cependant, il est vrai que dans le cas de la valeur 0.55, le débit est moyen, mais une fois que cette valeur diminue, la vidéo commence à prendre un peu de retard et certaines séquences risquent d'être perdues à cause de l'encombrement. Quant à la taille du tampon (TailleBfr), toujours à partir de la même figure, celle-ci donne de plus en plus de résultats moyens à partir de la valeur 0.3. Néanmoins, lorsque la valeur dépasse 0.4, le risque de perdre des informations intéressantes devient élevé. En effet, le tampon dans ce cas a une file d'attente assez occupée, ce qui entraînera des pertes de données. Enfin, pour les fonctions d'appartenance de la distance, nous avons divisé l'intervalle entre 0 et 1 en 5 plages. En fait, le voisin et la destination prennent une certaine distance après la valeur 0.2, ce qui devient intolérable à partir de la valeur 0.5. Ainsi, nous avouons que lorsque la distance est comprise entre 0 et 0.2, les résultats sont satisfaisants puisque les deux noeuds, c'est-à-dire le voisin et la destination, sont si proches l'un de l'autre.

En conclusion, notre étude paramétrique aide à comprendre comment les changements

des plages peuvent affecter les performances du protocole de routage. Notre théorie prend en considération le cas E, car il semble être une bonne approche.

### 4.3.2 Défis surmontés par rapport à la stabilité du réseau

Dans cette section, nous décrivons notre notion de stabilité du réseau et la façon dont nous traitons les problèmes concernés. Parmi les bienfaits escomptés de notre proposition, nous comptons une meilleure connectivité qui assure une continuité du flux, une prévention contre la boucle de routage mais aussi contre le mode périmètre du protocole GPSR causé par des échecs gourmands (*greedy*).

#### 4.3.2.1 Continuité du flux vidéo

Pour fournir une transmission vidéo continue sur un réseau VANET, il est important de sélectionner les noeuds efficaces capables d'assurer la connectivité du réseau autant que possible. Afin d'avoir un système intelligent qui prend des décisions en fonction de l'état du lien, nous devons nous concentrer sur toute la table de manière à répondre à notre logique dans son ensemble.

Pour l'exemple de la ligne 3 du tableau 4.8, avec une distance moyenne mais un faible coût, le paquet peut être transmis très rapidement au prochain voisin élu avant que celui-ci ne s'éloigne de la destination. Ceci est dû à la rapidité du transfert et au fort débit que connaît le lien. Cependant, lorsque le coût est élevé, le voisin à distance moyenne ne sera pas choisi. D'autre part, si nous sélectionnons le voisin à très courte distance mais dont le coût est élevé, le paquet peut ne pas être traité par le voisin choisi en raison de deux choses : i) le voisin élu a déjà une file chargée par des paquets en attente d'être traités ( $\text{tailleBfr} = H$ ), et donc le paquet attendra un bon moment avant d'être renvoyé, ii) le lien connaît un délai de transmission très élevé, donc le voisin risque de s'éloigner de la destination avant la réception du paquet.

#### 4.3.2.2 Boucle de routage

Comme discuté au début de la Sect. 4.3.2, nous cherchons à concevoir un système intelligent qui prend des décisions en fonction des faits en temps réel. Ce système gère plusieurs problèmes, en particulier la boucle de routage.

En fait, le choix du prochain saut dépend de la performance des liens qui change avec le temps en fonction du retard, du débit effectif et même de la taille du tampon au niveau des noeuds. Ainsi, lorsque les paquets de données surchargent un voisin, ou lorsque le débit de liaison entre ce voisin et le noeud expéditeur devient faible à très faible, alors automatiquement le protocole FzGR changera sa décision de routage car la performance du lien actuel a dégradé. En d'autres termes, la boucle est discontinuë et peut être une itération, deux ou même trois itérations, mais à un moment donné les performances de ce lien vont forcément se dégrader puisque les paramètres de QoS calculés en temps réel seront modifiés tout au long de la simulation.

En outre, le cas principal où nous pouvons rencontrer une boucle est le cas du renvoi par périmètre. Comme nous l'évitons, il n'y a aucun risque d'entrer dans une boucle.

Pour l'exemple de la ligne 11 du tableau 4.8, lorsque la distance est très courte, ce qui

est bien, mais le coût est élevé ou même très élevé, nous attribuons au poids du lien une valeur haute. En effet, nous pouvons attribuer à cette ligne soit M ou H, impossible de lui donner L, car le voisin peut tomber en boucle avec un autre noeud ayant une distance S ou VS. Ainsi, le système doit en déduire qu'il ne doit pas prendre le même choix. Par conséquent, nous avons besoin d'un équilibre qui respecte à la fois la distance et le coût, évitant ainsi d'entrer dans une boucle.

#### 4.3.2.3 Processus basé sur le périmètre

En réalité, le schéma proposé évite le processus de récupération : renvoi par périmètre. En fait, l'approche floue permet de sélectionner un prochain saut qui n'est pas nécessairement plus proche de la destination. Ainsi, si le noeud possède un certain nombre de voisins, il y aura donc toujours un meilleur voisin à choisir. De ce fait, le cas du périmètre est évité.

Si nous comparons l'algorithme du protocole FzGR avec celui du mode *greedy* du protocole GPSR, toute la différence réside au moment de l'initialisation. En fait, avec le mode *greedy*, la variable où le meilleur score est enregistré est initialisée par le noeud expéditeur avant tout calcul. Par la suite, ce meilleur score est comparé à ceux des voisins dans le but de garder le noeud optimale. Dans le cas où le meilleur score revient à l'expéditeur, le mécanisme basé sur le périmètre est invoqué. Cependant, en utilisant notre approche floue, l'expéditeur n'est pas initialisé par défaut comme étant le meilleur noeud, mais c'est plutôt un de ses voisins. Ainsi, ce n'est pas lui qui est pris comme référence d'initialisation, mais le premier voisin, de sorte que notre stratégie de recherche prend en compte tous les voisins existants (voir la figure 4.9).

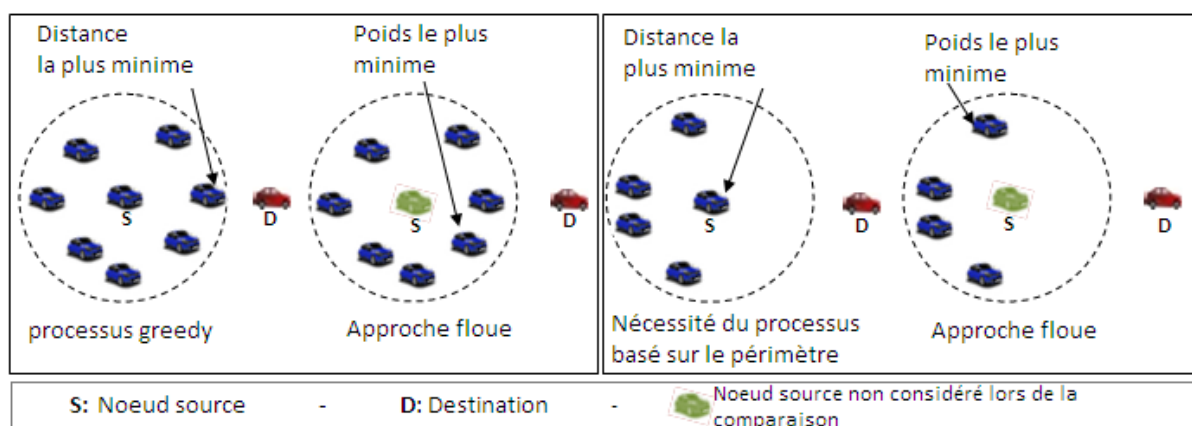


FIGURE 4.9 – Boucle de routage évitée par FzGR

## 4.4 Évaluation des performances

### 4.4.1 Paramètres de simulation

Le tableau 4.10 résume les principaux paramètres utilisés pour le reste de nos simulations.

TABLE 4.10 – Paramètres de simulation

Paramètres des couches physique et de liaison	
Modèle de propagation :	
sans obstacles	Two Ray Ground
avec obstacles	Nakagami
Portée de transmission	250 m
Couche MAC	IEEE 802.11p
Modèle de trafic	
Type de vidéo	MPEG-4 [104]
Fichier vidéo réel	Akiyo.yuv Foreman.yuv Highway.yuv
Taux du flux vidéo	30 frames/second
Trafic CBR de fond	20 connections
Taille du paquet CBR	512 octets
Taux du flux CBR	10 paquets/second
Modèle de mobilité	
Topologie	2500m * 2500m
Densité des noeuds	20-50-100-150-200-250
modèle	IDM-LC [164]
Modèle IDM-LC	
Intervalle de signalisation	15 seconds
voies	2
Accélération	18 à 50 (Km/h)

#### 4.4.2 Simulations et discussion par rapport à un milieu urbain sans obstacles

Cette section présente les résultats de comparaison entre GPSR original et la nouvelle variante proposée vis-à-vis de l'impact de la densité du réseau. Les facteurs à évaluer lors des simulations sont ceux cités dans la Section 2.4.1.1 du chapitre 2.

##### 4.4.2.1 Mesures de la QoS en fonction de la densité du réseau

Les figures 4.10 (a), 4.11 (a) et 4.12 (a) illustrent respectivement le taux de paquets délivrés (PDR) par rapport aux vidéos d'*Akiyo*, de *Foreman* et du *Highway* pour différents cas de densité. Nous constatons que, pour toutes les variations de densité, le taux du PDR en utilisant FzGR est plus élevé qu'avec le protocole GPSR classique. Comme le montre le tableau 4.11, FzGR peut augmenter le pourcentage du PDR d'*Akiyo* jusqu'à 83.87%, de *Foreman* jusqu'à 34.51%, et celui du *Highway* jusqu'à 75.20% par rapport à GPSR. Cette dégradation obtenue par GPSR est justifiée par l'utilisation de la distance  $d_{ij}$  comme une mesure unique lors de la prise de décision de routage. Cette métrique ne peut pas éviter les liens instables qui peuvent provoquer des défaillances dues à la congestion ou des

voisins périmés. En revanche, FzGR adopte un processus de décision de routage intelligent qui permet de sélectionner le meilleur et le plus stable prochain noeud en utilisant une métrique multi-contraintes de QoS basée sur la distance  $d_{ij}$ , mais aussi sur le délai, le débit, et la taille du tampon. En particulier, si la distance  $d_{ij}$  est courte, mais le débit et la taille du tampon sont respectivement bas et élevée, le noeud est vulnérable et peut entraîner une rupture de lien générant ainsi des pertes de paquets.

Les figures 4.10 (c), 4.11 (c) et 4.12 (c) illustrent le résultat du débit pour différents scénarios. Nous pouvons remarquer que quelque soit le nombre de véhicules, le débit avec FzGR est plus élevé qu'avec GPSR. Ainsi, comme le montre le tableau 4.11, le protocole FzGR augmente le débit pour *Akiyo*, *Foreman* et *Highway*, respectivement, jusqu'à 49.14%, 63.31% et 48.46% par rapport au protocole GPSR.

Nos améliorations réduisent également la charge du routage. Effectivement, les figures 4.10 (d), 4.11 (d) et 4.12 (d) montrent clairement les valeurs de cette métrique. Nous constatons que la charge du routage est nettement inférieure pour FzGR. Ceci est principalement justifié par la métrique de QoS à contraintes multiples qui procure un taux de livraison de paquets supérieur à celui du GPSR. En fait, au fur et à mesure que le PDR augmente, la charge d'itinéraire diminue puisque celle-ci représente le total de tous les paquets partagés sur le total des paquets vidéo reçus. D'autre part, si un voisin dont la taille du tampon est élevée, le flux du trafic entre lui et l'expéditeur est aussi élevé, et le temps de transmission est assez important, alors il ne sera pas choisi comme prochain saut, même si il est le plus proche de la destination. En conséquence, notre proposition permet de trouver une bonne connexion entre l'expéditeur et le récepteur de sorte qu'il n'y aura pas beaucoup de retransmission. Comme le montre le tableau 4.11, FzGR peut réduire la charge d'itinéraire pour *Akiyo*, *Foreman* et *Highway*, respectivement, jusqu'à 85.71%, 82.78% et 83.47% par rapport à GPSR.

Les trois paramètres susmentionnés sont influencés positivement par les poids qui ont offert une meilleure performance pour le protocole GPSR amélioré. En contre partie, le délai de bout en bout augmente, ce qui amène à se demander pourquoi. En effet, les figures 4.10 (b), 4.11 (b) et 4.12 (b) démontrent que le délai de transmission, en utilisant le protocole FzGR, a augmenté pour pratiquement tous les scénarios de densité. Cette dégradation s'explique par le fait que la variante FzGR prend un peu plus de temps que GPSR pour calculer les métriques de routage en temps réel afin d'obtenir le lien optimal. La raison peut avoir également une relation avec le schéma proposé qui utilise souvent mais pas toujours des noeuds proches de la destination. De ce fait, nous devons nous attendre à ce qu'il y ait un plus grand nombre de sauts depuis la source jusqu'à la destination. Néanmoins, comme l'ont mentionné les auteurs de [155], « le délai est un paramètre difficile à contrôler même dans les cas où il est utilisé comme métrique de routage pour trouver un lien optimal ». Certes, FzGR a contribué à augmenter le délai de bout en bout jusqu'à 28 ms, mais ce dernier est très faible compte tenu du délai qui ne doit pas dépassé la valeur de 150 ms dans le cas des flux vidéo [165]. Autrement dit, il y a une dégradation mais qui n'influence pas sur la qualité de la vidéo reçue, de plus qu'elle est compensée par l'amélioration des autres mesures de qualité de service.

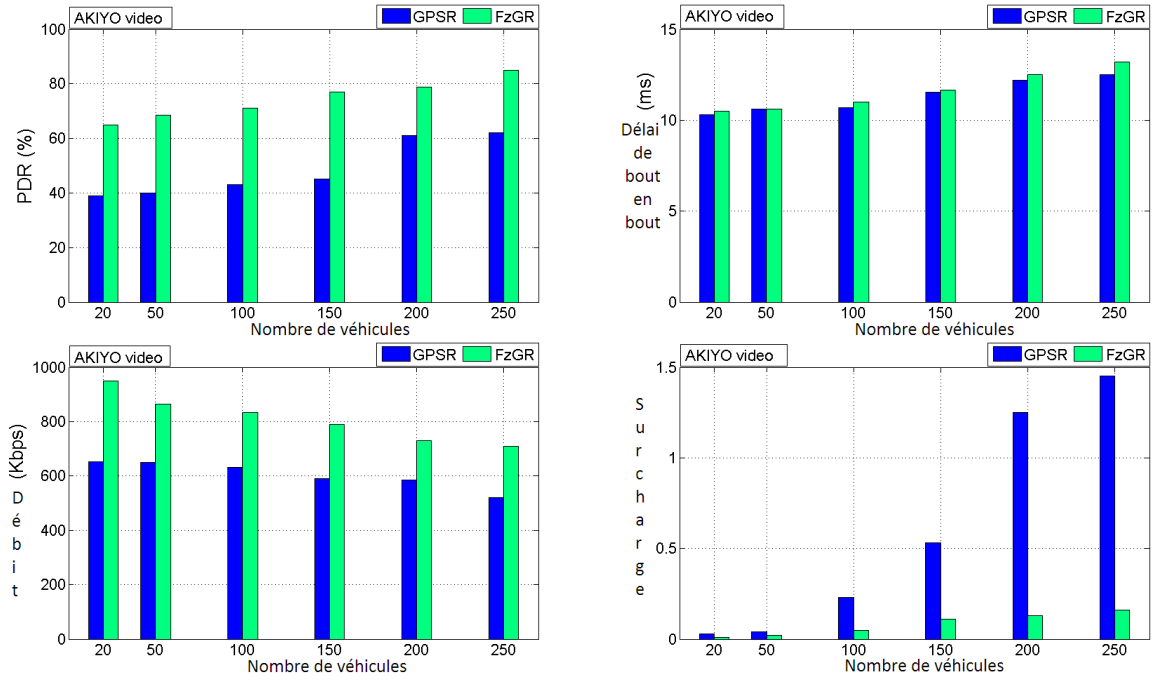


FIGURE 4.10 – Mesures de QoS pour *Akiyo* : (a) PDR, (b) délai, (c) débit et (d) surcharge

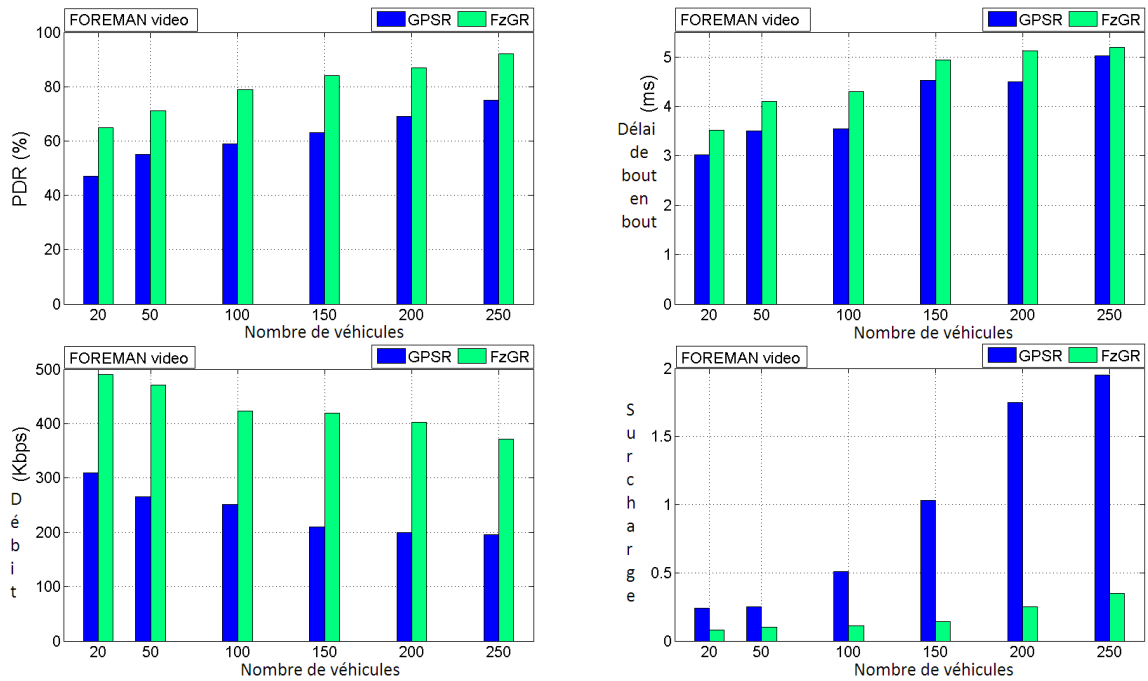


FIGURE 4.11 – Mesures de QoS pour *Foreman* : (a) PDR, (b) délai, (c) débit et (d) surcharge

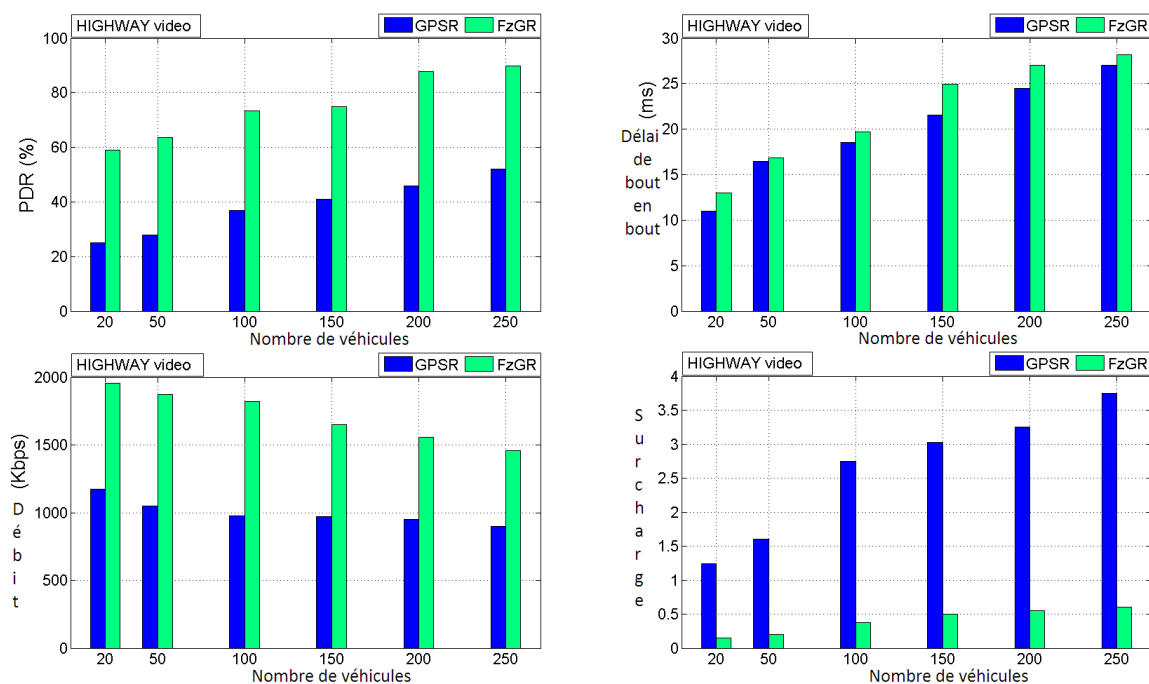


FIGURE 4.12 – Mesures de QoS pour *Highway* : (a) PDR, (b) délai, (c) débit et (d) surcharge

TABLE 4.11 – Taux d'amélioration de la QoS

		PDR	Délai	Débit	Surcharge
Akiyo	GPSR	43.03	12.64	625.4	1.4
	FzGR	79.12	13.55	932.7	0.2
	↑↓ (%)	↑ <b>83.87</b>	↑ <b>7.19</b>	↑ <b>49.14</b>	↓ <b>85.71</b>
Foreman	GPSR	61.23	3.53	251.12	1.8
	FzGR	82.36	4.30	410.11	0.31
	↑↓ (%)	↑ <b>34.51</b>	↑ <b>21.81</b>	↑ <b>63.31</b>	↓ <b>82.78</b>
Highway	GPSR	51.2	22.13	1339.3	3.75
	FzGR	89.7	25.01	1988.4	0.62
	↑↓ (%)	↑ <b>75.20</b>	↑ <b>13.01</b>	↑ <b>48.46</b>	↓ <b>83.47</b>

#### 4.4.2.2 Mesures de la QoE en fonction de la densité du réseau

La qualité de la vidéo en termes de la QoE est également étudiée et comparée pour les deux protocoles de routage GPSR et FzGR. En effet, la figure 4.15 illustre respectivement les mesures PSNR, SSIM et VQM en fonction de la densité des véhicules. Pour la première métrique, il faut mentionner que lorsque le PSNR est plus élevé, on remarque une plus grande similitude. La deuxième métrique VQM mesure les dégâts sur la vidéo reçue. Elle doit être plus proche de 0 pour dire que le protocole est efficace. En ce qui concerne la mesure SSIM, elle reflète la meilleure qualité de la vidéo pour une valeur égale à 1. D'après

ces définitions, les résultats montrent clairement que le protocole FzGR est bien meilleur que GPSR.

À partir du tableau 4.12, FzGR peut augmenter la valeur du PSNR et du SSIM en utilisant la vidéo *Akiyo*, respectivement, jusqu'à 41.64% et 35%. En revanche, la métrique VQM est réduite jusqu'à 60.93% par rapport au protocole GPSR. En ce qui concerne le cas de *Foreman*, nous constatons dans le même tableau que FzGR augmente le PSNR et le SSIM jusqu'à 36.04% et 73.33% respectivement, tandis que VQM diminue de 47.19%. Pour la troisième vidéo prise en compte dans nos simulations, c'est-à-dire la vidéo du *Highway*, FzGR donne de bon résultats par rapport à GPSR. En fait, le PSNR a augmenté de 9.65%, le SSIM a augmenté de 16.67% et le VQM a diminué de 63.93%.

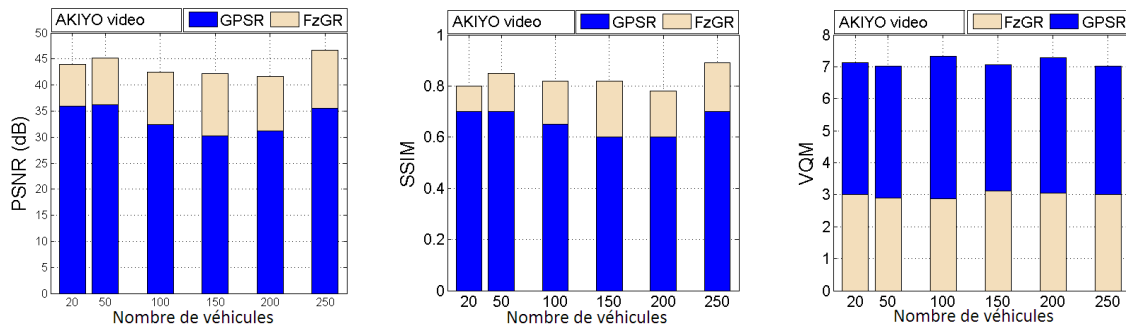


FIGURE 4.13 – Mesures de QoE pour la vidéo d'*Akiyo*

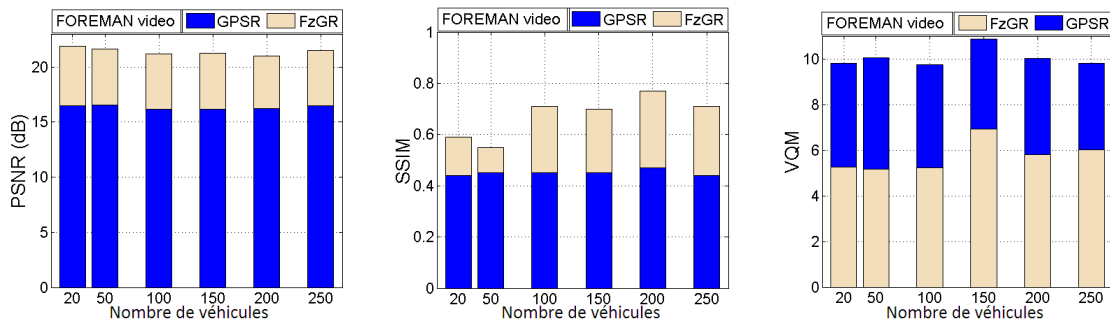


FIGURE 4.14 – Mesures de QoE pour la vidéo de *Foreman*

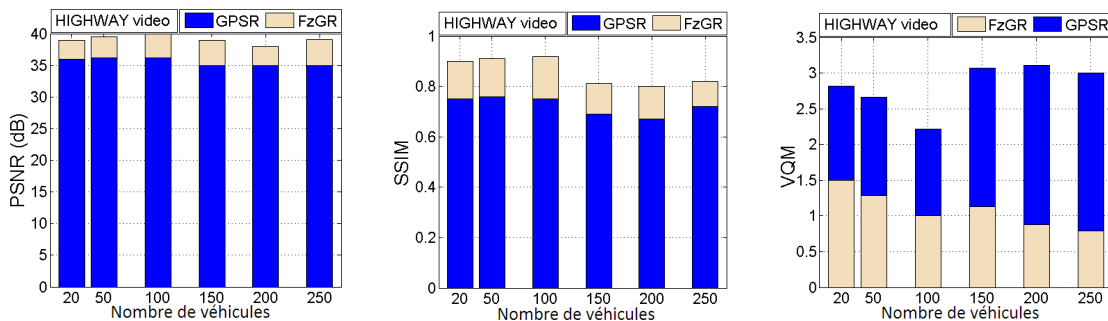


FIGURE 4.15 – Mesures de QoE pour la vidéo du *Highway*

FIGURE 4.16 – Captures vidéo de : *Akiyo*, *Foreman* et *Highway* avec (a) GPSR et (b) FzGR







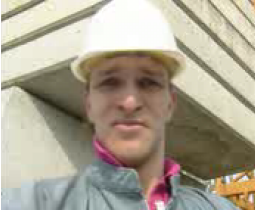

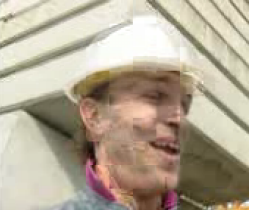
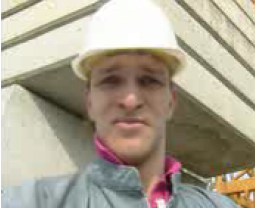
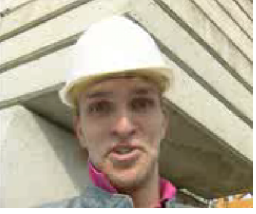
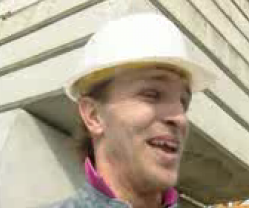






<b>AKIYO</b>	<b>Frame 57</b>	<b>Frame 215</b>	<b>Frame 225</b>
<b>GPSR</b>			
<b>FzGR</b>			
<b>FOREMAN</b>	<b>Frame 55</b>	<b>Frame 90</b>	<b>Frame 116</b>
<b>GPSR</b>			
<b>FzGR</b>			
<b>HIGHWAY</b>	<b>Frame 18</b>	<b>Frame 33</b>	<b>Frame 40</b>
<b>GPSR</b>			
<b>FzGR</b>			

TABLE 4.12 – Taux d'amélioration de la QoE

Video d'Akiyo	PSNR	SSIM	VQM
GPSR	30.02	0.60	7.55
FzGR	42.52	0.81	2.95
↑↓ (%)	↑ <b>41.64</b>	↑ <b>35.00</b>	↓ <b>60.93</b>

Video de Foreman	PSNR	SSIM	VQM
GPSR	17.2	0.45	9.79
FzGR	23.4	0.78	5.17
↑↓ (%)	↑ <b>36.04</b>	↑ <b>73.33</b>	↓ <b>47.19</b>

Video de Highway	PSNR	SSIM	VQM
GPSR	36.15	0.78	3.05
FzGR	39.64	0.91	1.10
↑↓ (%)	↑ <b>9.65</b>	↑ <b>16.67</b>	↓ <b>63.93</b>

En conclusion, les résultats montrent que le protocole de routage FzGR proposé surpasse de manière significative le protocole GPSR pour les différents flux vidéo.

#### 4.4.3 Simulations et discussion par rapport à un milieu urbain avec obstacles

##### 4.4.3.1 Modèle de propagation radio Nakagami

L'étude par simulation nous aide à utiliser des modèles afin de porter un jugement sur la viabilité du problème dans le monde réel. Par conséquent, et vu que la précision est une exigence importante, nous devons se mettre dans un cas qui se rapproche de la réalité par l'intermédiaire d'un modèle de propagation radio bien représentatif pour la communication véhiculaire (figure 4.17).

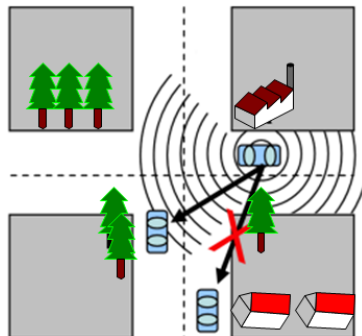


FIGURE 4.17 – Exemple de scénario avec obstacles.

En toute évidence, une ville est connue par ses bâtiments, ses arbres, ses rivières et ses différents événements qui font obstacle aux signaux radio. À cette fin, nous avons utilisé un autre modèle de propagation plus adapté au scénario urbain [166], appelé *Nakagami*. Ce modèle représente une alternative au modèle de propagation *TwoRayGround* qui

peut modéliser efficacement les caractéristiques des différents scénarios du monde réel. En changeant la valeur du facteur  $m$  (voir les équations 4.7 et 4.8), divers scénarios peuvent être simulés. Comparé aux modèles existants, le modèle *Nakagami* a plus de paramètres configurables pour permettre une représentation plus précise du canal de communication sans fil.

La distribution de *Nakagami* est définie par la fonction suivante :

$$f(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right), x \geq 0, \Omega > 0, m \geq 1/2 \quad (4.7)$$

L'amplitude du signal à une distance donnée peut être obtenue par un changement de variables. Elle est décrite par une distribution gamma sous la forme suivante :

$$p(x) = \left(\frac{m}{\Gamma}\right)^m \frac{x^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx}{\Omega}\right), x \geq 0 \quad (4.8)$$

Où  $\Gamma$  est interprétée comme étant la puissance moyenne reçue, et  $m$  est ce que l'on appelle le paramètre de forme. Leurs valeurs sont des fonctions de distance. Ainsi, le modèle *Nakagami* est défini par deux fonctions :  $\Gamma(m)$  and  $m(d)$ .

```

Propagation/Nakagami set use_nakagami_dist_ true
Propagation/Nakagami set gamma0_ 2.0
Propagation/Nakagami set gamma1_ 2.0
Propagation/Nakagami set gamma2_ 2.0
Propagation/Nakagami set d0_gamma_ 200
Propagation/Nakagami set d1_gamma_ 500
Propagation/Nakagami set m0_ 1.0
Propagation/Nakagami set m1_ 1.0
Propagation/Nakagami set m2_ 1.0
Propagation/Nakagami set d0_m_ 80
Propagation/Nakagami set d1_m_ 200

```

FIGURE 4.18 – Modèle urbain basé sur *Nakagami* adopté lors de nos simulations

#### 4.4.3.2 Mesures de la QoS en fonction de la densité du réseau

Afin de toucher de près la différence entre les deux modèles *Nakagami* et *Two-Ray Ground*, nous avons refait l'étude comparative avec les mêmes conditions mais uniquement pour la vidéo de *Foreman*. Par conséquent, nous pouvons constater clairement, d'après les résultats de la figure 4.19, que les obstacles affaiblissent la puissance du signal transmis et par la suite causent une dégradation des performances. En ce qui concerne le modèle *Two-Ray Ground*, il est évident qu'il souffre d'un délai élevé dans une situation de trafic élevé vu que tous les noeuds de la gamme sont en concurrence pour utiliser le canal. Alors que pour le modèle probabiliste *Nakagami*, tous les noeuds ne reçoivent pas le signal avec succès, le nombre de noeuds en compétition pour le canal est inférieur. Certes, la dégradation est là avec *Nakagami*, mais en utilisant le protocole de routage FzGR, elle se montre très légère puisque notre démarche tient en compte la qualité du lien et par la suite la qualité du signal.

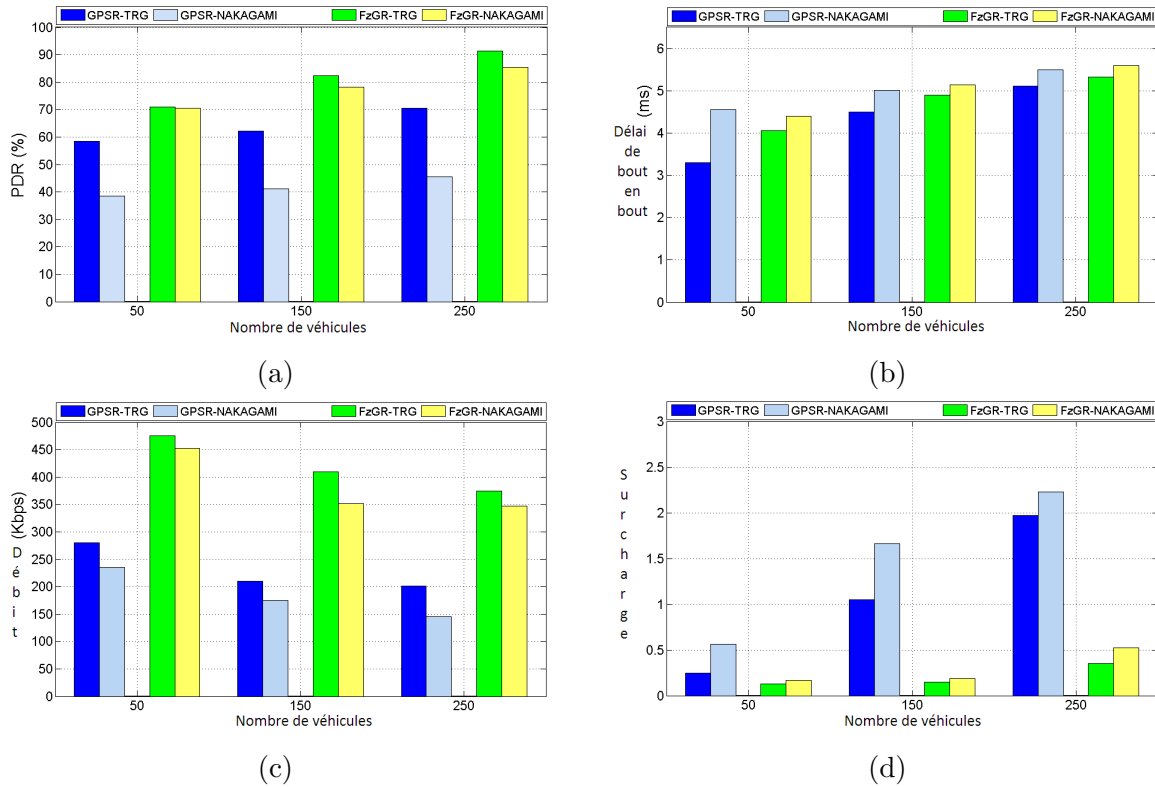


FIGURE 4.19 – *Two Ray Ground vs Nakagami* ; Mesures de QoS pour la vidéo de *Foreman* : (a) PDR, (b) délai, (c) débit et (d) surcharge

En effet, la figure 4.19(a) montre que la métrique PDR en utilisant le FzGR est d'environ 80,85% plus élevée que GPSR. Les figures 4.19 (c-d) montrent que FzGR est d'environ 87,5% plus élevé et 76,08% plus moins que GPSR pour, respectivement, le débit et la surcharge. Cela est dû en partie à la méthode d'acheminement intelligent qui permet de transmettre les paquets de données de manière plus sûre en moyenne aux réseaux denses. Cependant, le délai de bout en bout lors de l'utilisation de FzGR est supérieur d'environ 2% par rapport au protocole GPSR. Cela peut s'expliquer par le fait que FzGR calcule la qualité des liens, en temps réel, pour sélectionner le noeud suivant. Mais comme expliqué précédemment, la valeur obtenue est éligible compte tenu du délai qui ne doit pas dépasser 150 ms dans le cas des flux vidéo [165].

#### 4.5 Protocole FzGR vs variantes de GPSR tirées de la littérature

Comme le protocole GPSR est un protocole de routage de référence de plusieurs études de recherche, nous pouvons indirectement comparer notre GPSR amélioré à d'autres algorithmes en fonction du taux d'amélioration. À cette fin, six différentes améliorations de GPSR issues de la littérature ont été comparées au protocole de routage FzGR, à savoir :

- Le protocole de routage GpsrJ + qui prédit sur quel segment de route son noeud de jonction voisin transmettra les paquets [167].
- Le protocole GBSR-B qui inclut un tampon pour stocker temporairement les paquets au lieu de les supprimer lorsqu'il n'y a pas de saut suivant [168].

- Le routage prenant en charge la carte multi-métrique (The multi-metric map-aware routing ou MMMR) qui utilise quatre métriques différentes, à savoir, la distance par rapport à la destination, la densité des véhicules, leur trajectoire et la bande passante disponible, afin de prendre de bonnes décisions de transfert [169].

- Le protocole de routage sans balise (The reliable beaconless routing protocol ou RBRP) qui a été proposé pour effectuer la transmission uni-cast basée sur le récepteur sans l'aide du message HELLO [170].

- Le routage adaptatif flou à décision d'attribut multiple (The adaptive fuzzy multiple attribute decision routing ou AFMADR) par lequel un transporteur de paquets est censé être un décideur dans la sélection d'une cible pour la prochaine transmission du houblon avec plus de facteurs à considérer [171].

- Enfin, le protocole GPSR-N qui essaie de trouver les coordonnées du noeud, dont la position est avantageuse, au lieu de la destination finale [172].

Contrairement à notre contribution, où un trafic cohérent tel que la vidéo est utilisé, les études mentionnées ci-dessus ne prennent en compte que les flux à débit constant (CBR). D'après le tableau 4.13, FzGR a montré le meilleur pourcentage où l'amélioration du PDR et du débit est respectivement d'environ 80.85% et 87.5%, tandis que le délai montre une légère dégradation d'environ 2% par rapport au protocole GPSR. Cependant, les autres algorithmes ont démontré une amélioration qui n'excède pas 41.67%, 58.62% et 39,47% pour respectivement le PDR, le délai et le débit. Par conséquent, nous pouvons attester que le protocole de routage FzGR est meilleur que tous ces protocoles.

Pour conclure, le protocole de routage FzGR a une meilleure performance et une certaine stabilité par rapport à un ensemble de protocoles (voir le tableau 4.13). En effet, l'utilisation améliorée des liaisons en vertu de la QoS en temps réel, a permis au protocole proposé de transférer les paquets vers la destination avec une probabilité plus élevée en comparaison avec les autres protocoles évalués.

TABLE 4.13 – FzGR vs récentes variantes de GPSR

Protocoles de routage	Année public.	Type trafic	Logique flou	Obstacles	PDR	Délai	Débit
GpsrJ+	2007	CBR	No	Yes	↑ 15.22%	↓ 58.62%	-
GBSR-B	2013	CBR	No	Yes	↑ 30.38%	↑ 600.0%	↑ 28.00%
MMMR	2014	CBR	No	Yes	↑ 20.00%	↑ 450.0%	↑ 39.47%
RBRP	2014	CBR	No	Yes	↑ 35.50%	↓ 54.54%	-
AFMADR	2015	CBR	Yes	Yes	↑ 22.39%	↓ 23.81%	-
GPSR-N	2016	CBR	No	Yes	↑ 41.67%	↓ 33.33%	-
FzGR	2018	Video	Yes	Yes	↑ 80.85%	↑ 02.00%	↑ 87.50

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé deux modèles flous basés sur des mesures de QoS associées pour sélectionner les propriétés du meilleur lien et assurer une bonne

connectivité réseau. Étant le mécanisme de routage le plus prometteur dans VANET, le protocole de routage basé sur la position GPSR a été intégré et amélioré pour générer une nouvelle variante appelée FzGR. Nous avons étudié nos modèles flous pour la meilleure sélection du prochain saut en temps réel, tout en tenant compte de différents paramètres tels que le délai de transmission, le débit, la taille du tampon et la distance. Le point culminant est de prendre en charge le trafic vidéo et d'assurer un niveau de satisfaction lors de la réception.

L'évaluation a été réalisée dans deux conditions différentes : sans obstacles en utilisant le modèle de propagation *Two Ray Ground* et avec obstacles en utilisant *Nakagami*. En fait, le modèle de propagation radio a un fort impact sur la performance d'un protocole vu que le nombre de noeuds dans un domaine de collision représente un paramètre d'entrée important pour l'interférence. Cela a un effet direct sur la capacité d'un noeud à transmettre un paquet à un autre noeud, ce qui peut entraîner des valeurs différentes pour des mesures telles que le débit, les paquets abandonnés, la charge moyenne et la latence. En comparant les deux modèles de propagation *Two-Ray Ground* et *Nakagami*, les résultats diffèrent pour le même scénario mais sans pour autant influencer sur les performances du protocole proposé FzGR.

Le protocole FzGR améliore significativement la qualité de diffusion en termes de QoS et de QoE. Cependant, il peut être encore amélioré en minimisant le délai de transmission et en augmentant d'avantage le taux de paquets délivrés. À cette fin, nous prévoyons dans le chapitre qui suit d'incorporer à FzGR un algorithme multi-prochains-sauts pour pouvoir bénéficier des liaisons fonctionnelles de la topologie [173].

---

**Sommaire**

5.1	Introduction . . . . .	<b>105</b>
5.2	Travaux antérieurs en vertu de l'approche multi-chemins . . . . .	<b>106</b>
5.3	Système multi-prochains-sauts proposé pour FzGR . . . . .	<b>107</b>
5.3.1	Amélioration du protocole FzGR . . . . .	107
5.3.2	Type de sélection multi-prochains sauts . . . . .	113
5.4	Évaluation des performances . . . . .	<b>114</b>
5.4.1	Paramètres de simulation . . . . .	114
5.4.2	Simulations et discussion des résultats . . . . .	115
5.5	Conclusion . . . . .	<b>118</b>

---

**5.1 Introduction**

Dans un environnement véhiculaire purement ad-hoc, l'instabilité et le dynamisme des noeuds communicants impactent significativement la qualité de la vidéo lors de la transmission. Afin de palier ces défis, une nouvelle forme de routage est utilisée : le routage multi-chemins [174]. En fait, l'implémentation de ce type de routage dans les réseaux VANET va contribuer à l'amélioration de plusieurs critères, notamment la répartition de charge, la fiabilité, la tolérance aux pannes, la sécurité et la QoS.

C'est dans cette optique que la deuxième contribution prend tout son sens. En effet, nous proposons une extension du protocole FzGR, appelée MNH-FGR (*Multi Next Hops Fuzzy Geographical Routing*). Comme FzGR, le protocole MNH-FGR utilise bien évidemment l'algorithme flou mais en considérant un nombre limité de noeuds voisins aptes à assurer un bon acheminement des données. L'objectif est de sélectionner, d'une manière dynamique, un ensemble de liaisons dont le poids est inférieur ou égal à un seuil prédéfini. Cette démarche va permettre d'envoyer les paquets de données vers plusieurs voisins optimaux. Notre approche multi-prochains-sauts, qui respecte l'équilibrage de charge, cherche à promouvoir la qualité de transmission de la vidéo en améliorant davantage le taux de paquets délivrés et surtout en minimisant le délai de bout en bout afin d'avoir une bonne perception de l'utilisateur par rapport au contenu final reçu. La figure (figure 5.1) illustre la différence entre un saut, une liaison et un chemin.

Dans ce chapitre, nous allons citer les travaux antérieurs les plus représentatifs qui introduisent l'approche multi-chemins dans la contribution à l'amélioration du routage.

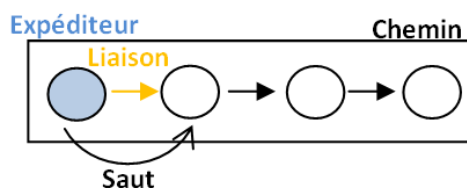


FIGURE 5.1 – Illustration des termes suivants : saut, liaison et chemin

Par la suite, nous allons présenter le protocole de routage proposé MNH-FGR qui associe la technique de sélection multi-prochains-sauts à l'approche floue présentée dans le chapitre 4. Notre variante MNH-FGR hérite toutes les caractéristiques du protocole FzGR, en plus qu'elle intègre l'algorithme d'ordonnancement WRR (*Weighted Round-Robin*) afin d'équilibrer entre les différentes liaisons sélectionnées en fonction de leurs poids.

## 5.2 Travaux antérieurs en vertu de l'approche multi-chemins

Afin de maintenir un degré de connectivité élevé et d'assurer une bonne QoS, plusieurs algorithmes ont été conçus par les chercheurs du domaine des réseaux sans fil. Ces algorithmes sont basés sur l'idée d'exploiter, au préalable, les noeuds de la topologie capables d'assurer la continuité du flux de données. Que ce soit pour les réseaux VANET, MANET ou même pour les réseaux RCSF, l'approche multi-chemins s'est montrée prometteuse. En effet, la performance de divers protocoles de routage existants a été améliorée en prenant en considération des stratégies multi-chemins efficaces.

En 2011, le protocole GBR (*Greedy-based Backup Routing*) a été présenté par les auteurs de [175]. GBR est un protocole de sauvegarde basé sur le principe *greedy* conçu spécifiquement pour les réseaux MANET. Il prend en compte à la fois la longueur de l'itinéraire et la durée de vie de la liaison afin d'atteindre une stabilité de route élevée. Le chemin principal est construit principalement à partir d'un mécanisme de transfert glouton tandis que le chemin de secours local pour chaque lien est établi en fonction de la durée de vie du lien.

Le protocole MP-OLSR (*MultiPath OLSR*) a été également développé en 2011 pour les réseaux MANET [110]. Il représente une variante améliorée à voies multiples du standard OLSR. MP-OLSR optimise la qualité de la transmission des données en améliorant le taux de livraison des paquets et l'équilibrage de la charge. Il utilise le nombre de sauts comme une mesure unique qui aide à la décision du routage. Néanmoins, sa capacité à trouver le meilleur chemin en termes de QoS demeure limitée.

En 2012, les auteurs de [176] se sont basés sur le protocole GPSR afin d'en tirer un nouveau protocole de routage dévoué au RCSF, appelé AGEM (*Adaptive Greedy-compass Energy-aware Multipath*). En utilisant un protocole de routage purement *greedy* comme GPSR, le flux de données va toujours suivre la même route. En revanche, avec le protocole AGEM, le flux est acheminé vers différents chemins. En effet, pour répondre aux contraintes de la transmission multimédia et afin de maximiser la durée de vie du réseau, AGEM exploite les capacités multi-chemins du réseau RCSF dans le but d'équilibrer la charge entre les noeuds. Il est à mentionner que le protocole AGEM utilise un modèle de transfert COMPASS adapté (voir le chapitre 3).

Les auteurs de [177] ont proposé le protocole JMSR (*Junction-based Multipath Source Routing*) pour les réseaux VANET. Ce protocole a été approuvé en 2013 par la communauté de recherche. JMSR est un protocole de routage géographique multi-chemins, où les chemins alternatifs sont les plus disjoints possible. Le noeud source prends en considération deux routes vers la destination dont chacune est composée d'une séquence de jonctions.

Deux ans plus tard, le protocole MP-OLSR a été étudié et amélioré. En effet, en 2015, le protocole FQ-MP-OLSR a été proposé par les auteurs de [1] en se fondant sur le protocole MP-OLSR. L'objectif est d'atteindre une QoS et une QoE acceptables pour la transmission vidéo. Dans cette optique, les auteurs ont développé deux systèmes flous pour FQ-MP-OLSR. Le premier calcule la mesure de la QoS à contraintes multiples basée sur trois métriques de QoS. Le second adapte les fonctions de coût utilisées pour pénaliser les chemins précédemment calculés afin de trouver les chemins suivants grâce à l'algorithme de Dijkstra. Les auteurs ont également intégré l'algorithme d'ordonnancement WRR à FQ-MP-OLSR pour la planification du trafic multimédia. Les poids des chemins nécessaires pour cette planification sont calculés à partir de la mesure de QoS multi-contraintes générée par le premier système flou.

Revenant au contexte des RCSF, les auteurs de [178] ont conçu le protocole CSA-MGR (*Carrier Sense Aware Multipath Geographic Routing protocol*). Grâce à un processus distribué et dynamique, ce protocole crée plusieurs chemins en évitant toute portée de détection partagée. CSA-MGR emploie une nouvelle métrique, appelée le nombre de voisins communs, afin de garantir une construction de voies plus rapide et efficace.

En outre, toujours en 2015 mais cette fois-ci en vertu du réseau VANET, EMP-AODV (*Enhanced Multipath AODV*) a été mis au point par les auteurs de [179]. Contrairement à AODV et AOMDV, qui choisissent le chemin le plus court vers la destination, EMP-AODV adopte une stratégie multi-chemins combinée à un algorithme basé sur la durée de vie attendue des liaisons. L'enjeu est de garantir de meilleures performances.

## 5.3 Système multi-prochains-sauts proposé pour FzGR

### 5.3.1 Amélioration du protocole FzGR

Dans cette partie, nous discutons l'amélioration de FzGR qui s'est déroulée en deux étapes. La première implémente l'approche multi-prochains-sauts, tandis que la seconde vise à équilibrer la charge entre les différentes liaisons sélectionnées.

#### 5.3.1.1 Approche multi-prochains-sauts

En raison de la grande mobilité qui caractérise les réseaux VANET, la méthodologie de transmission qu'adopte le protocole FzGR demeure insatisfaisante. En effet, l'élection d'un seul prochain noeud voisin permet d'utiliser un seul chemin pendant tout le transfert. Ceci peut conduire à une dégradation significative des performances causée par la quantité importante de paquets transmise vers ce même chemin, impliquant ainsi une surcharge. Autrement dit, si un noeud traite deux paquets, dans une période déterminée, pourquoi les envoyer vers un même prochain saut (voisin), alors qu'il peut y avoir une autre voie avec un voisin aussi performant que le premier ?

Pour répondre à cette interrogation, deux améliorations du standard GPSR ont été développées puis implémentées au niveau du calcul du meilleur prochain saut. Le but est d'exploiter d'autres liens de la topologie qui peuvent améliorer la QoS du réseau. Nous citons : GPSR-2P [116], qui prend en considération les deux premiers voisins les plus proches de la destination au lieu d'un seul, et GPSR-kP [117], qui adopte le concept de trajets multiples. GPSR-kP permet d'utiliser un nombre  $k$ , limité entre 1 et 6, de voisins proches de la destination et capables de transférer le nombre  $k$  de paquets possédés par le même noeud source. La destination des paquets est tenue en compte lors de la décision. Les figures 5.2 et 5.3 illustrent les organigrammes explicatifs des deux propositions.

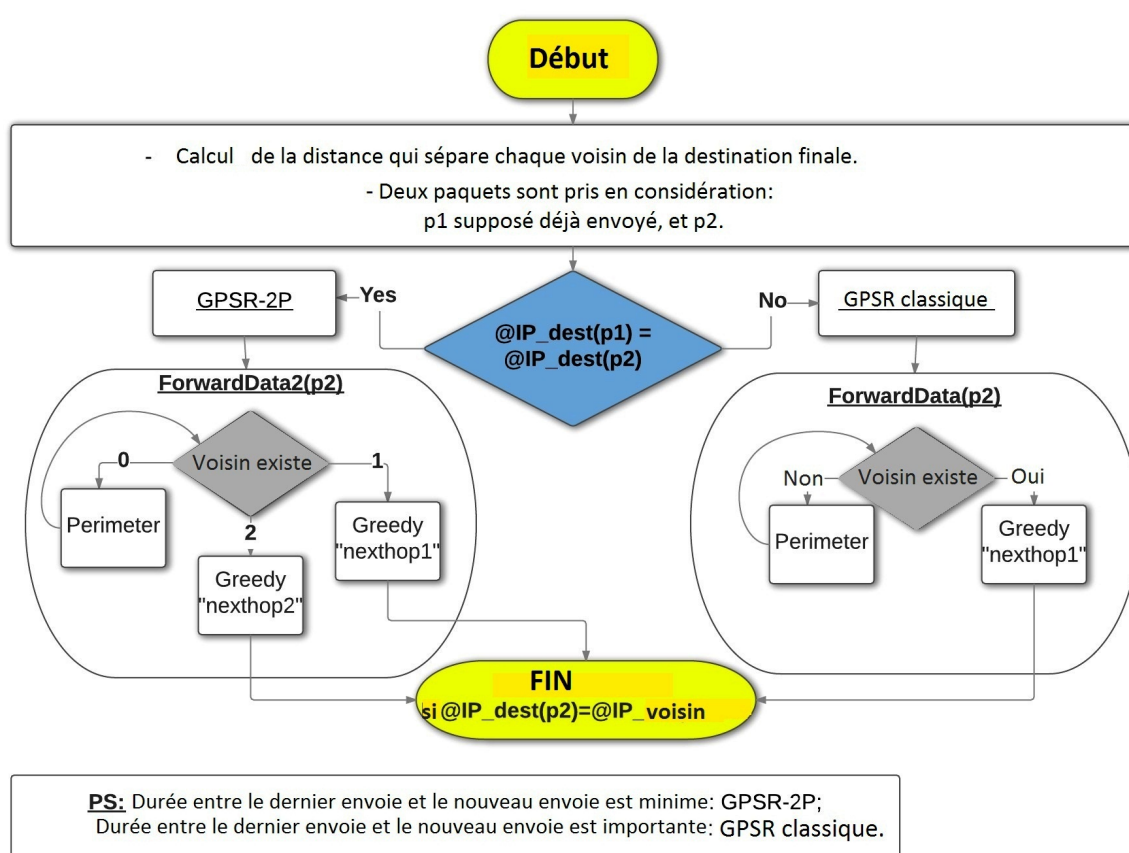


FIGURE 5.2 – Méthodologie constructive de l'approche GPSR-2P

Certes, c'est deux récents protocoles ont révélé de bons résultats par rapport à ceux de GPSR, sauf qu'ils demeurent insatisfaisants vis-à-vis des exigences des réseaux VANET d'un côté et du flux multimédia d'un autre côté. En effet, GPSR-2P et GPSR-kP ne prennent pas en considération des informations supplémentaires de QoS pour pouvoir prendre des décisions de routage en temps réel. D'autre part, ils utilisent un nombre de sauts fixe.

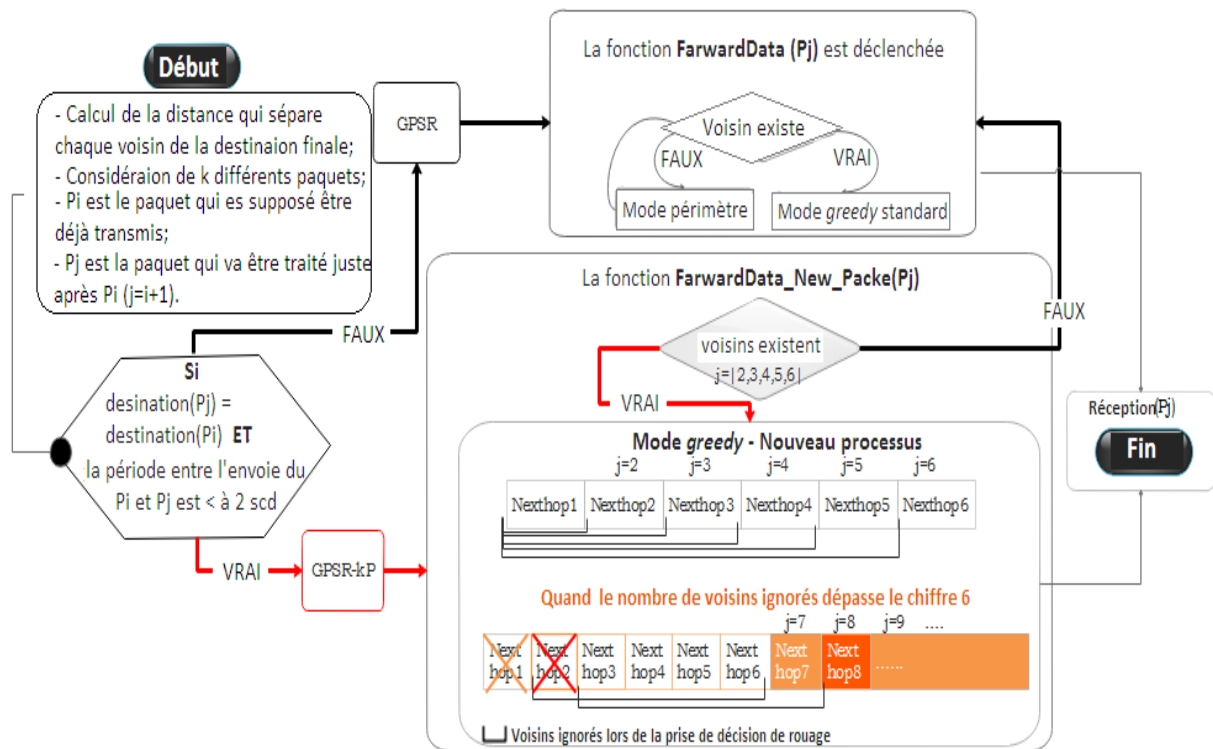


FIGURE 5.3 – Méthodologie constructive de l’approche GFSR-kP

Grâce au protocole de routage intelligent MNH-FGR, le choix du nombre de sauts est dynamique de telle sorte qu’il varie selon l’état du réseau. Ainsi, l’expéditeur peut sélectionner un seul saut, deux sauts, trois sauts, ..., etc, à raison de ne pas franchir le seuil maximal affecté au poids de la liaison. Ce seuil est exprimé par l’équation 5.1 :

$$Seuil = PoidsMin + 20\%PoidsMin \tag{5.1}$$

Où, *PoidsMin* est le poids minimal trouvé après avoir comparé tous les poids des liaisons existantes ; le choix de 20% est justifié par la simulation.

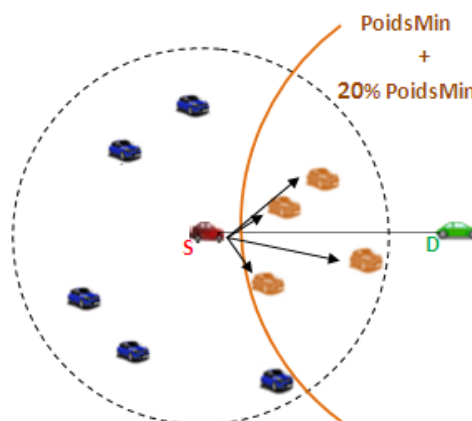


FIGURE 5.4 – Illustration de la politique pondérée pour MNH-FGR

La conception de notre variante MNH-FGR est dictée par les facteurs suivants :

*Voies alternatives* : la transmission vidéo est très sensible au temps. De ce fait, le trafic multimédia devrait être livré en satisfaisant les exigences du délai de transmission et du retard. Dans les protocoles de routage typiques, le voisin le plus proche menant vers le plus court chemin est fortement utilisé, tandis que d'autres voisins menant vers d'autres chemins alternatifs plus performants les uns que les autres sont inexploitable. C'est bien le cas de GPSR et FzGR, où un unique meilleur voisin, soit en termes de distance ou en termes de mesure multi-contraintes, est toujours le plus utilisé lors du transfert de données tandis que les autres voisins capables eux aussi à répondre aux exigences des réseaux VANET sont ignorés.

*Capacité d'envoi* : un flux multimédia connaît généralement des paquets de grande taille. Par conséquent, si une seule voie est utilisée pour acheminer ces paquets, les exigences de transmission peuvent être plusieurs fois supérieures à la capacité de transmission maximale des noeuds.

*Décision en temps réel* : comme la topologie peut changer à tout moment d'une manière imprévisible, il est plus prudent de prendre les décisions de routage de manière distribuée et en temps réel. Cela permettra de réagir au préalable aux changements de la topologie et d'éviter d'entraîner la transmission de paquets vers des noeuds non disponibles ou non fiables.

*Choix des noeuds* : dans les réseaux fortement déployés, différents voisins peuvent être sélectionnés comme candidats afin de transférer des paquets. Pour en déduire une sélection appropriée, le processus de sélection des noeuds doit prendre en compte la distance de chaque voisin par rapport à la destination finale, le poids des différentes liaisons, et le seuil prédéfini du poids à ne pas dépasser.

*Équilibrage de charge* : afin de maximiser la durée de disponibilité des noeuds VANET et par conséquent minimiser les défaillances des liens, l'équilibrage de la charge doit être pris en compte lors de la conception d'un protocole de routage multi-prochains-sauts.

Nous décrivons dans ce qui suit le processus d'équilibrage de charge implémenté dans notre algorithme.

### 5.3.1.2 Équilibrage de charge

Le rôle principal de la distribution de charge est d'utiliser les chemins élus pour le transport des paquets d'une manière équilibrée. En appliquant l'algorithme multi-prochains-sauts au protocole FzGR, les paquets sont distribués vers plusieurs liaisons directes, i.e. plusieurs voisins directs de chaque noeud expéditeur, ainsi le processus est répété pour chaque noeud participant jusqu'à ce que la destination finale soit atteinte. Afin d'équilibrer la charge entre ces différentes liaisons, nous proposons d'intégrer le mécanisme d'ordonnancement Round-Robin pondéré WRR [180] dans MNH-FGR afin de

supporter des liaisons multiples hétérogènes. En effet, cet algorithme nécessite des informations supplémentaires pour la sélection. Ces informations ont été tirées à partir de la logique floue appliquée dans FzGR. Par ailleurs, si les poids des liaisons sont différents, WRR peut éviter la sur-utilisation des liaisons à poids élevé et la sous-utilisation des liaisons à poids faible. Dans notre schéma 5.6, nous calculons le poids  $p_i$  de la liaison  $L_i$  par l'approche floue présentée dans le chapitre 4.

L'algorithme retourne des liaisons multiples et pondérées. Dans ce cas, les liaisons avec des poids plus faibles pourraient acheminer un plus grand nombre de paquets contrairement à ceux dont le poids est élevé. En d'autres termes, le nombre de paquets attribués à des liaisons est limité par les poids de ces liaisons. La distribution de la charge du trafic, basée sur le principe de WRR (voir l'algorithme 5.1), est effectuée par chaque noeud expéditeur afin de distribuer les paquets dans les  $n$  chemins vers le noeud de destination  $D$  en fonction du paramètre poids  $p_i$ .

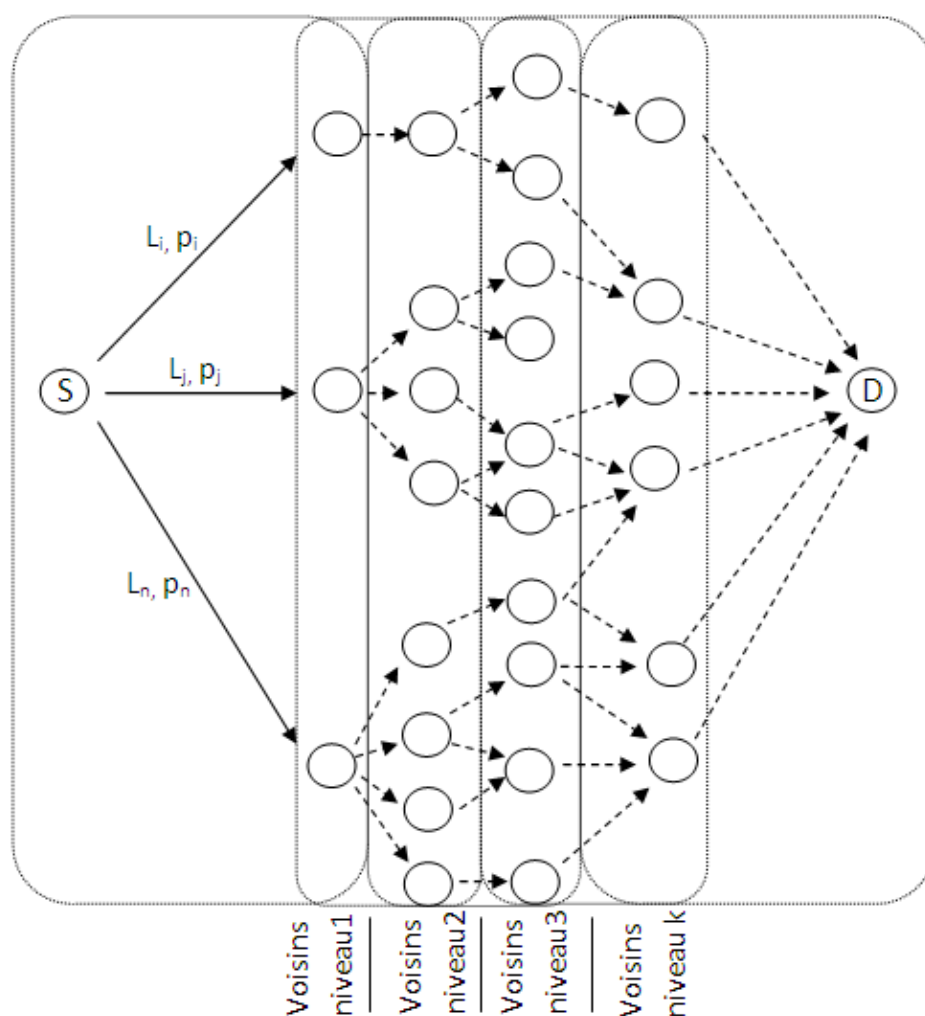


FIGURE 5.5 –  $N$  liaisons pondérées entre chaque noeud expéditeur et ses voisins directs depuis la source  $S$  jusqu'à la destination  $D$

TABLE 5.1 – Algorithme multi-prochains-sauts de MNH-FGR

---

```

1 : LbN  $\leftarrow$   $\emptyset$ ; //liste des meilleurs voisins  $\varepsilon$  à la portée de l'expéditeur
2 : cst  $\leftarrow$  20%; //constante

3 : Function mpNexthop( $dest_x, dest_y$ )
4 :     nexthop  $\leftarrow$  null;
5 :     if (LbN is empty)
6 :         createListBN( $dest_x, dest_y$ );
7 :     end if
8 :     if (LbN is not empty)
9 :         nexthop  $\leftarrow$  LbN(0); //affecter au nexthop le premier élément de la liste
10 :         LbN.remove(0); //supprimer le premier élément de la liste
11 :         LbN.pushback(nexthop); //l'ajouter à la fin de la même liste
12 :     end if
13 :     return nexthop;
14 : End Function
15 : Procedure createListBN( $dest_x, dest_y$ )
16 :     l  $\leftarrow$  [ $nr_1, nr_2, nr_3, \dots, nr_i$ ]  $\varepsilon$  Range(Expéditeur);
17 :     nexthop;
18 :     score, seuilScore;
19 :     if (LbN is not empty)
20 :         LbN  $\leftarrow$   $\emptyset$ ;
21 :     end if
22 :     minScore  $\leftarrow$  Infinity;
23 :     While (l is not empty)
24 :         nexthop = fuzzyNextHop( $dest_x, dest_y, l$ );
25 :         if (nexthop = null)
26 :             exit while;
27 :         end if
28 :         score  $\leftarrow$  getScore(nexthop, $dest_x, dest_y$ );
29 :         if (score < minScore)
30 :             minScore  $\leftarrow$  score;
32 :             seuilScore  $\leftarrow$  minScore * (1 + cst);
31 :         else if (seuilScore < score)
32 :             exit while;
33 :         end if
34 :         l.removeElement(nexthop); //supprimer nexthop de la liste des voisins
35 :         LbN.pushback(nexthop); //l'ajouter à la liste des meilleurs voisins
36 :     end while
37 : End Procedure

```

```

38 : Function fuzzyNexthop( $dest_x, dest_y, l$ ) //  $l$  est la liste des voisins
39 :                                     //  $[nr_1, \dots, nr_i] \in$  à la portée de l'expéditeur
40 :   minScore  $\leftarrow$  getscore( $nr_1, dest_x, dest_y$ );
41 :   nexthop  $\leftarrow nr_1$ ;
42 :   For each  $nr_i \in l$ 
43 :     score  $\leftarrow$  getscore( $nr_i, dest_x, dest_y$ );
44 :     if (score < minScore)
45 :       minScore  $\leftarrow$  score;
46 :       nexthop  $\leftarrow nr_i$ ;
47 :   End if
48 :   End for
49 : return nexthop;
50 : End Function

```

### 5.3.2 Type de sélection multi-prochains sauts

L'approche à prochains sauts multiples peut être divisée en trois catégories selon la pertinence du noeud participant : i) noeuds disjoints, ii) liens disjoints et iii) noeuds/liens non-disjoints [181].

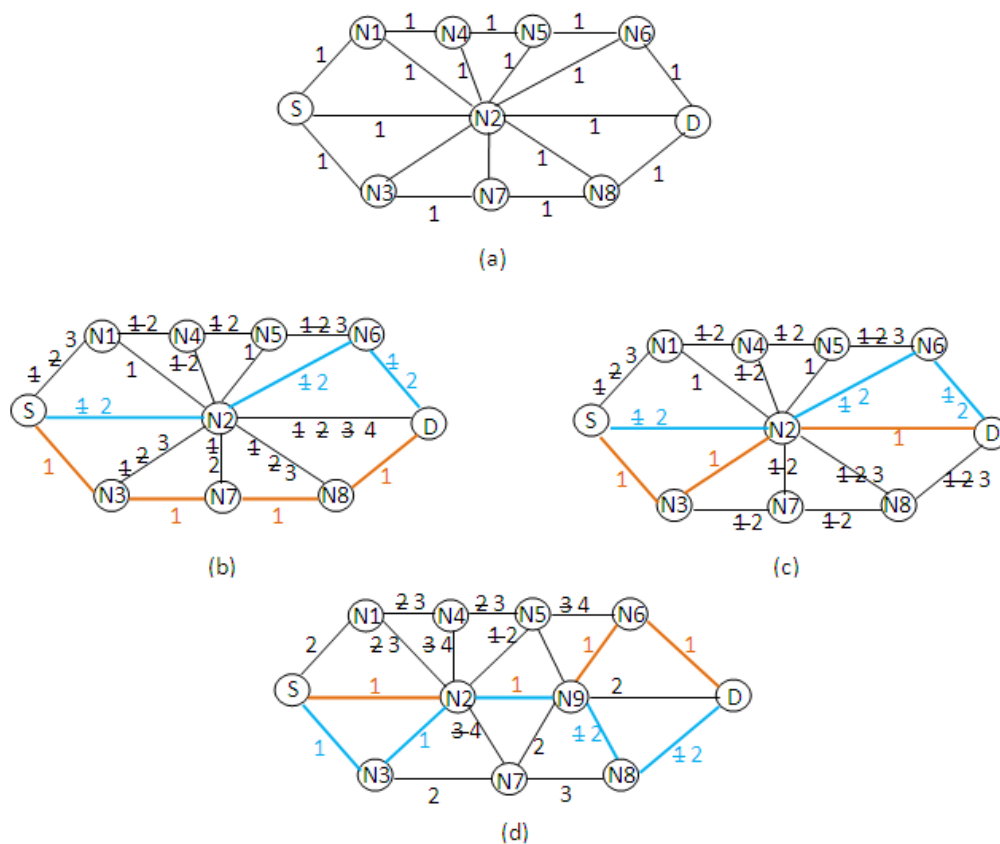


FIGURE 5.6 – Illustration des trois types de sélection multi-prochains sauts en fonction des poids des liaisons : (a) graphe initial, (b) noeuds disjoints, (c) liens disjoints et (d) noeuds/liens non disjoints.

### 5.3.2.1 Noeuds disjoints

Le routage à liaisons multiples peut aboutir à des chemins dont les noeuds sont disjoints. Ce cas est connu par un routage sans liaison vu qu'aucune n'est partagée entre les noeuds ou entre les chemins existants. Un exemple de cette catégorie est présenté sur la figure 5.6(b). En effet, les routes entre le noeud source S et le noeud de destination D (S-N2-N6-D, S-N3-N7-N8-D) sont des routes disjointes.

### 5.3.2.2 Chemins disjoints

Un chemin disjoint fait référence au fait que la liaison n'est pas partagée entre les différents chemins mais peut avoir des noeuds communs. Comme le montre la figure 5.6(c), les deux chemins entre le noeud source S et le noeud de destination D (S-N2-N6-D, S-N3-N2-D) sont des chemins disjoints, où le noeud N2 est le noeud commun.

### 5.3.2.3 Noeuds/Chemins non-disjoints

Le routage à liaisons multiples peut aussi conduire à des chemins multiples non disjoints. Ces derniers se réfèrent aux chemins qui ont des noeuds partagés et des liaisons communes. La figure 5.6(d) illustre clairement ce cas. En effet, (S-N2-N9-N6-D, S-N3-N2-N9-N8-D) sont des chemins non disjoints avec N2-N9 représente la liaison commune.

## 5.4 Évaluation des performances

### 5.4.1 Paramètres de simulation

Dans les simulations abordées dans ce qui suit, nous avons opté pour le modèle de propagation radio *Nakagami* qui prend en considération les obstacles afin de mieux refléter la réalité. Nous avons aussi utilisé une map réelle pour la validation de notre deuxième contribution. En effet, avec le simulateur de mobilité VanetMobiSim, nous avons importé des cartes de la base de données TIGER/Line du US Census Bureau [182], qui inclut une couverture complète des États-Unis, de Porto Rico et de bien d'autres [183]. Pour nos simulations, nous avons considéré une circulation de type centre-ville appelée TGR11001 qui représente le district de Columbia, WA [182]. Le déploiement des véhicules est établi par le modèle de pilote intelligent avec changement de voie (IDM\_LC), ce qui rend la simulation dans la couche réseau fiable. La figure 5.7 représente des captures de l'environnement urbain utilisé. En ce qui concerne le flux vidéo, les séquences de *Foreman* sont considérées.

Les autres paramètres de simulation restent identiques aux valeurs figurantes dans le tableau 4.10. Les protocoles de routage évalués sont notamment, GPSR-2P, GPSR-kP, FzGR et MNH-FGR.

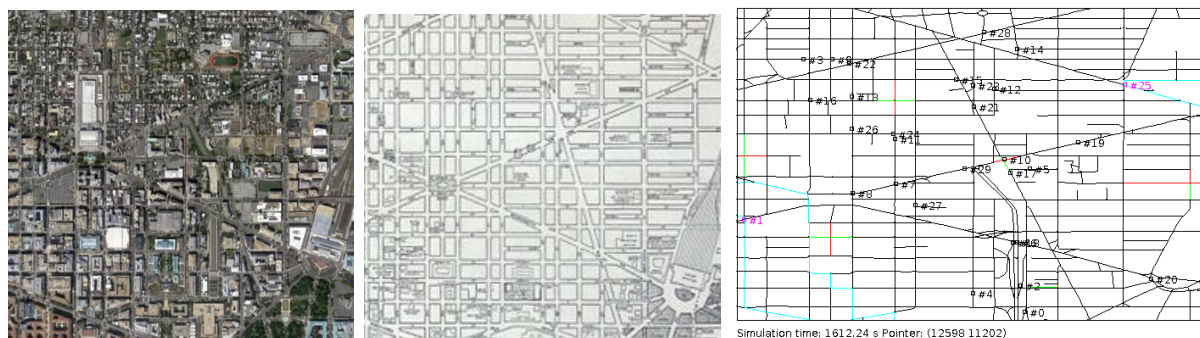


FIGURE 5.7 – District de Colombie, Washington

## 5.4.2 Simulations et discussion des résultats

### 5.4.2.1 Mesures de la QoS en fonction de la densité du réseau

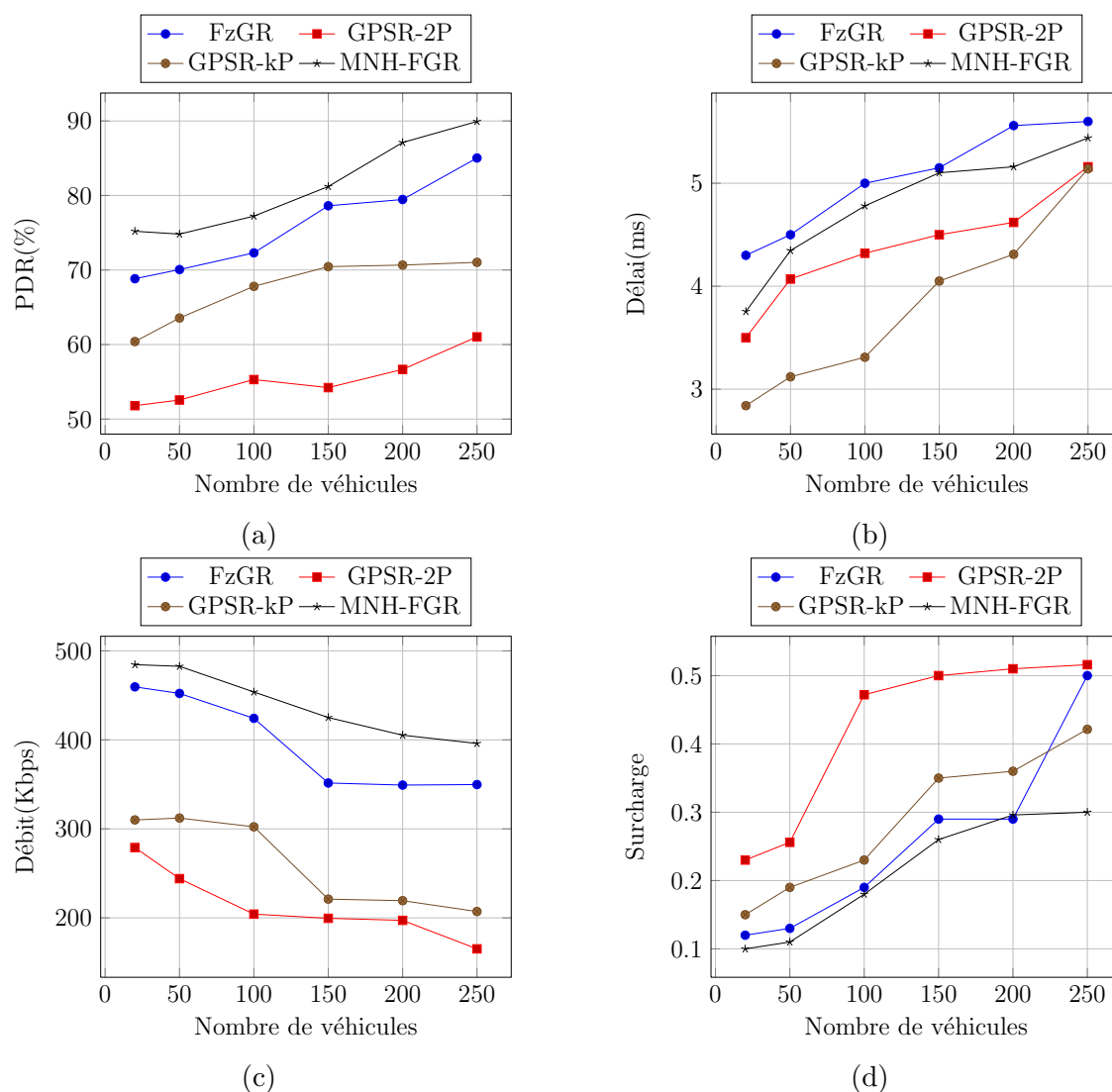


FIGURE 5.8 – Mesures de QoS en fonction de la densité : (a) PDR, (b) Délai, (c) Débit et (d) Surcharge

### a. Mesure du PDR

La figure 5.8(a) illustre le taux de paquets délivrés (PDR) pour différents cas de densité. Nous constatons que, pour toutes les variations de densité, le résultat du PDR en utilisant le protocole MNH-FGR est plus significatif par rapport aux résultats fournis par les deux variantes multi-chemins de GPSR, i.e., GPSR-2P et GPSR-kP, ainsi que par ceux qui sont fournis par la variante floue FzGR. En regardant les deux tableaux 5.2 et 5.3, nous remarquons que MNH-FGR peut augmenter le taux de paquets délivrés jusqu'à 9.63%, 26.61% et 47.35% par rapport à, respectivement, FzGR, GPSR-2P et GPSR-kP. La dégradation obtenue par les protocoles GPSR-2P et GPSR-kP est justifiée par l'utilisation de  $d_{ij}$  comme une mesure unique lors de la décision de routage. Cette métrique ne peut pas éviter les liens instables qui peuvent provoquer des bris en raison de la congestion ou des voisins périmés. Cependant, MNH-FGR adopte un processus de décision de routage habile qui lui permet de sélectionner un ensemble de meilleurs et plus stables prochains sauts, d'une manière dynamique, en termes de QoS.

### b. Mesure du débit

Les figures 5.8(c) illustre le débit pour différents scénarios de densité. Nous pouvons remarquer que quel que soit le nombre de véhicules, le débit du MNH-FGR est plus élevé que celui des autres protocoles. Ainsi, d'après les tableaux 5.2 et 5.3, MNH-FGR augmente le débit jusqu'à 35.55%, 47.07% et 73.26% par rapport à, respectivement, FzGR, GPSR-2P et GPSR-kP. Cela est normal puisque le nombre de paquets délivrés est élevé à chaque étape d'amélioration de GPSR.

### c. Mesure de la surcharge

Nos améliorations réduisent également la charge du routage. En effet, la figure 5.8(d) montre clairement les valeurs de cette métrique. Nous constatons que la charge du routage est nettement inférieure pour MNH-FGR. En effet, ce protocole utilise l'algorithme d'ordonnancement des paquets WRR pour équilibrer la transmission des paquets entre les différentes liaisons. Les poids de ces liaisons, utilisées par l'algorithme WRR, sont calculés par le système flou en fonction de la métrique multi-contrainte à QoS. En fait, au fur et à mesure que la mesure du PDR augmente, la charge d'itinéraire diminue puisque celle-ci représente le total de tous les paquets partagés sur le total des paquets vidéo reçus. Ajoutant aussi que notre proposition assure une connectivité entre l'expéditeur et le récepteur, de sorte qu'il n'y ait pas beaucoup de retransmission. Comme montré par les tableaux 5.2 et 5.3, MNH-FGR peut réduire la charge d'itinéraire jusqu'à 11.76%, 42.11% et 61.7% par rapport à, respectivement, FzGR, GPSR-2P et GPSR-kP.

### d. Mesure du délai

La figure 5.8(b) démontre que le délai de transmission pour MNH-FGR augmente pour pratiquement tous les scénarios de densité en le comparant aux deux protocoles

multi-chemins. Cette dégradation s'explique par le fait que la variante multi-prochains-sauts prend un peu plus de temps pour calculer la qualité des liaisons en temps réel afin de sélectionner les plus optimaux. Certes, le protocole MNH-FGR a contribué à augmenter le délai de bout en bout jusqu'à 5.5 ms, mais ce dernier reste très faible par rapport au seuil qui ne doit pas dépassé la valeur de 150 ms dans le cas des flux vidéo [165]. Autrement dit, il y a une dégradation mais qui n'influence pas la qualité de la vidéo reçue. Néanmoins, nous avons réussi à diminuer le délai par rapport au protocole FzGR jusqu'à 13.63%, ce qui approuve l'efficacité de notre approche.

TABLE 5.2 – Taux d'amélioration : MNH-FGR vs GPSR-kP pour toutes les variations de densité

Nombre de véhicules	QoS				QoE		
	PDR	Délai	Débit	Surcharge	PSNR	VQM	SSIM
20	↑24.50%	↑32.04%	↑23.99%	↓33.33%	↑3.03%	↓42.88%	↑23.63%
50	↑17.72%	↑39.42%	↑22.59%	↓42.11%	↑14.20%	↓38.69%	↑29.62%
100	↑13.89%	↑44.41%	↑17.03%	↓21.73%	↑14.44%	↓35.62%	↑25.86%
150	↑15.26%	↑25.96%	↑47.07%	↓25.71%	↑18.42%	↓37.18%	↑18.03%
200	↑23.28%	↑22.04%	↑39.19%	↓17.77%	↑13.00%	↓35.71%	↑25.00%
250	↑26.61%	↑15.56%	↑42.87%	↓28.81%	↑25.30%	↓41.06%	↑12.90%

TABLE 5.3 – Taux d'amélioration : MNH-FGR vs FzGR, GPSR-2P et GPSR-kP

Par rapport à	Taux d'amélioration de MNH-FGR						
	QoS				QoE		
	PDR	Délai	Débit	Surcharge	PSNR	VQM	SSIM
GPSR-2P	↑47.35%	↑10.65%	↑73.26%	↓61.7%	↑50.00%	↓65.29%	↑95.00%
GPSR-kP	↑26.61%	↑44.41%	↑47.07%	↓42.11%	↑25.30%	↓42.88%	↑29.62%
FzGR	↑9.63%	↓13.64%	↑35.55%	↓11.76%	↑12.5%	↓31.03%	↑23.81%

#### 5.4.2.2 Mesures de la QoE en fonction de la densité du réseau

La figure 5.9 compare la qualité de la vidéo de *Foreman*, perçue par l'utilisateur, relativement à chaque protocole de routage utilisé, notamment, FzGR, GPSR-2P, GPSR-kP et MNH-FGR. Nous remarquons que MNH-FGR donne de meilleures valeurs par rapport aux autres protocoles. Ainsi, comme le résume le tableau 5.2, MNH-FGR augmente les paramètres PSNR et SSIM, respectivement, jusqu'à 25.30% et 29.62% par rapport à GPSR-kP. Nous remarquons aussi que le paramètre VQM est réduit jusqu'à 42.88%.

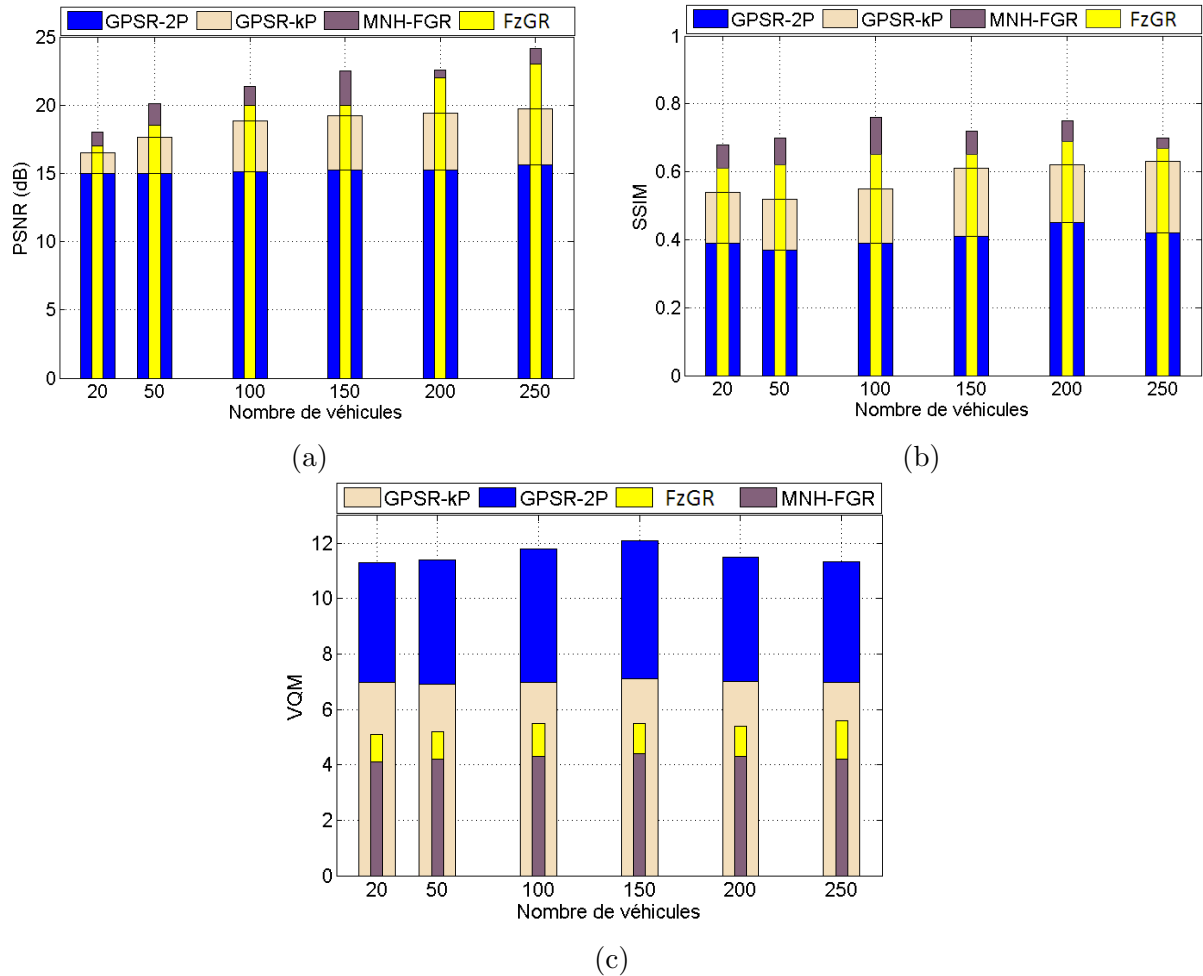


FIGURE 5.9 – Mesures de QoE en fonction de la densité : (a) PSNR, (b) SSIM et (c) VQM

Par ailleurs, il est notamment nécessaire de marquer le taux d'amélioration de notre nouvelle variante par rapport à notre première contribution. En effet, d'après le tableau 5.3, le protocole MNH-FGR peut augmenter le taux de bruit de signalisation ainsi que l'indice de similarité structurelle, respectivement, jusqu'à 12.5% et 23.81% par rapport à FzGR. La métrique de la qualité de la vidéo, quant à elle, est réduite jusqu'à 31.03%.

## 5.5 Conclusion

Lors des simulations réalisées pour ce chapitre, nous avons octroyé le modèle de propagation radio *Nakagami* vu sa crédibilité envers les obstacles et son rapprochement à la réalité. Par ailleurs, nous avons proposé et implémenté une variante améliorée du protocole FzGR, appelée MNH-FGR. L'objectif est d'atteindre une QoS et une QoE satisfaisantes pour la transmission vidéo dans les réseaux VANET. Pour cette raison, nous avons ajouté une approche multi-prochains sauts au système flou implémenté par FzGR afin d'exploiter au préalable et d'une façon dynamique la topologie du réseau. Les poids des liaisons, nécessaires pour l'ordonnancement des paquets, représentent la métrique multi-contrainte à QoS calculée par le système flou.

Le protocole de routage MNH-FGR a réussi à améliorer la QoS et la QoE de la

---

transmission de la vidéo par rapport aux protocoles GPSR-2P et GPSR-kP qui utilisent le mécanisme *greedy* classique, mais aussi celles déduites par rapport au protocole flou FzGR. La technique proposée est conforme aux exigences de la révocabilité, la diversité et la sécurité.





---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

### Synthèse

Récemment, les réseaux VANET ont vu un intérêt exponentiel en raison de leur capacité d'adaptation potentielle à différents environnements. Cependant, ces réseaux sont confrontés à des défis de conception importants en raison de leur instabilité. Dans cette optique, la communication véhiculaire est l'une des points les plus touchés dans ce domaine. En effet, l'instabilité et la mobilité constituent souvent les principaux obstacles à la mise en place des protocoles de routage pour différentes applications. En fait, le protocole de routage doit utiliser efficacement des ressources limitées et s'adapter aux conditions de changement du réseau, à savoir, la mobilité des noeuds, la taille du réseau, la densité du trafic et le partitionnement du réseau. Ainsi, tout protocole de communication de la couche réseau devrait prendre en compte ces problèmes délicats. Plusieurs travaux de recherche ont été publiés dans ce sens. Ils ont tous opté pour le routage géographique vu que c'est un axe très prometteur pour les réseaux véhiculaires. Les chercheurs utilisent la simulation comme moyen d'évaluation des performances car elle présente un avantage économique et une souplesse dans la création des scénarios de simulation et permet d'envisager un grand nombre de situations, ce qui n'est pas le cas avec le mode d'évaluation dans un environnement réel.

Le but principal de ce travail de thèse était de traiter le problème de l'efficacité du routage par rapport aux applications multimédia dans les VANET. Pour bien comprendre nos contributions, nous avons fourni en premier lieu le contexte général de notre thèse. En effet, nous avons étudié l'environnement VANET et les motivations derrière nos choix. Ensuite, nous avons présenté une analyse critique des protocoles de routage les plus pertinents qui ont été proposés dans la littérature. L'un des protocoles le plus utilisé et qui a inspiré nos travaux est le protocole basé sur la position géographique GPSR. Ce dernier a récemment reçu une attention considérable due à son évolutivité et son déploiement facile. Il consiste essentiellement à sélectionner périodiquement, parmi tous les voisins de l'expéditeur, le voisin le plus proche de la destination. Son principe est de permuter, selon le déploiement des noeuds dans le réseau, entre le processus *greedy* et le processus par périmètre.

Les travaux présentés dans ce mémoire se situent plus particulièrement dans la première phase de recherche du protocole GPSR : la recherche par la méthode *greedy*. Nos deux principales contributions ont porté sur deux volets, notamment l'amélioration de GPSR par une approche floue multi-critères efficace en QoS et l'amélioration de la pre-

mière proposition par l'approche de sélection multi-sauts associée à l'approche floue.

Dans la première contribution, nous avons proposé une stratégie qui vise à sélectionner le meilleur voisin en termes de QoS et de distance. Cette sélection se fait sur la base des mises à jours, calculées en temps réel, des mesures de QoS de chaque liaison expéditeur-voisin. Notre variante FzGR s'appuie sur deux systèmes flous. Le premier calcule une métrique multi-contraintes basée sur trois mesures de QoS (le délai, le débit et la taille du tampon), quant au deuxième système flou, il est basé sur la métrique multi-contraintes et la distance vu que cette dernière représente un facteur important pour préserver le principe de GPSR. Ainsi, le nouveau algorithme de sélection du meilleur voisin augmentera davantage la performance du réseau. Les résultats de simulation sur NS-2 ont montré que FzGR est significativement bien plus rendant que le protocole GPSR dans les VANET.

Dans la seconde contribution, nous nous sommes projetés vers une nouvelle variante multi-sauts du protocole FzGR afin d'exploiter davantage la topologie du réseau. MNH-FGR permet d'augmenter la qualité de transmission des paquets de données vidéo en améliorant le taux de paquets délivrés et l'équilibrage de charge. L'objectif était d'atteindre une QoS et une QoE encore plus meilleures. Le protocole MNH-FGR intègre deux améliorations : (i) L'implémentation de l'algorithme multi-sauts afin d'avoir  $n$  meilleur voisins élus, tel que  $n$  ne dépasse pas une certaine limite de distance vers la destination ; (ii) L'intégration de l'algorithme d'ordonnancement *Round Robin* pour ordonnancer le trafic multimédia entre plusieurs sauts ; (iii) Une petite modification au niveau du code afin d'éviter de tomber sur des boucles de transmissions a été insérée. Les expérimentations sur NS-2, ont montré que le protocole MNH-FGR améliore significativement la QoS et la QoE de la transmission de la vidéo dans un réseau VANET.

Les modèles de sélection proposés ont aboutit à des résultats intéressants, ce qui n'est pas étonnant vue la performance qu'a démontré plusieurs modèles de logique flous et ceux de multi-chemins lors de toutes leurs applications précédentes en routage des données. Nos approches peuvent être facilement intégrées dans un autre protocole de routage géographique dans le but de l'améliorer.

## Perspectives

À court terme, nous projetons d'évaluer l'efficacité du routage GPSR dans un contexte de recherche réel en utilisant un modèle urbain contenant des obstacles : application à la région de Rabat. Ceci permet d'évaluer nos approches avec un nombre plus important de défis.

D'après nos études, nous avons remarqué aussi que différents modèles de propagation donnent des résultats non-similaires pour un même scénario. Ceci est un problème très sérieux dans les réseaux VANET, en particulier dans une situation d'accident où les messages de sécurité doivent être propagés à tous les véhicules qui se trouvent à proximité de l'accident dans un délai très court. L'utilisation d'un modèle simple, qui suppose que tous les véhicules de la gamme ont reçu le message avec succès alors qu'en réalité ils ne l'ont pas reçu, peut générer des conséquences fatales. Ceci nous impose de penser sérieusement à une perspective liée à ce contexte.

Toutefois, nos travaux ouvrent la voie également vers diverses perspectives dans le

domaine du routage géographique. Nous citons, l'implémentation d'une stratégie qui vise à étendre la visibilité du réseau ; Application de l'approche *Cross-Layer*.

Nous pouvons également améliorer notre approche en ajoutant une procédure d'authentification pour éviter l'usurpation d'identité des véhicules.





---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abdelali Boushaba, Adil Benabbou, Rachid Benabbou, Azeddine Zahi, and Mohammed Oumsis. An intelligent multipath optimized link state routing protocol for QoS and QoE enhancement of video transmission in MANETs. *Computing*, 98(8) :803–825, 2016.
- [2] F Cunha, L Villas, A Boukerche, G Maia, A Viana, RAF Mini, and AAF Loureiro. Data communication in VANETs : survey, applications and challenges. *Ad Hoc Networks*, 10, 2016.
- [3] Neeraj Kumar, Naveen Chilamkurti, and Joel JPC Rodrigues. Learning automata-based opportunistic data aggregation and forwarding scheme for alert generation in vehicular ad hoc networks. *Computer Communications*, 39 :22–32, 2014.
- [4] Kostas E Bekris, Konstantinos I Tsianos, and Lydia E Kavraki. Safe and distributed kinodynamic replanning for vehicular networks. *Mobile Networks and Applications*, 14(3) :292–308, 2009.
- [5] Alfred Daniel, Anand Paul, Awais Ahmad, and Seungmin Rho. Cooperative intelligence of vehicles for intelligent transportation systems (ITS). *Wireless Personal Communications*, 87(2) :461–484, 2016.
- [6] Alberto J Gonzalez, Jesus Alcober, Ramon Martin de Pozuelo, Francesc Pinyol, and Kayhan Zrar Ghafoor. Context-aware multimedia service composition using quality assessment. In *Multimedia and Expo (ICME), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011.
- [7] Bertrand Ducourthial and Farah El Ali. Architecture pour communication véhicules-infrastructure. In *CFIP'2009*, 2009.
- [8] Othmane Alaoui Fdili. *Optimisation multicritères de la qualité de service dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil*. PhD thesis, Valenciennes, 2015.
- [9] Tim Szigeti and Christina Hattingh. Quality of service design overview. *Cisco, San Jose, CA, Dec*, 2004.
- [10] Moez Jerbi. *Protocoles pour les communications dans les réseaux de véhicules en environnement urbain : Routage et GeoCast basés sur les intersections*. PhD thesis, Evry-Val d'Essonne, 2008.

- [11] Lin Xu, Ralf Tonjes, Toni Paila, Wolfgang Hansmann, Matthias Frank, and Markus Albrecht. Drive-ing to the internet : Dynamic radio for ip services in vehicular environments. In *Local Computer Networks, 2000. LCN 2000. Proceedings. 25th Annual IEEE Conference on*, pages 281–289. IEEE, 2000.
- [12] Ming-Chiao Chen, Jiann-Liang Chen, and Teng-Wen Chang. Android/osgi-based vehicular network management system. *Computer Communications*, 34(2) :169–183, 2011.
- [13] European commission. fp 7 information and communication technologies. 2016.
- [14] Detlev Mohr, N Müller, A Krieg, P Gao, HW Kaas, A Krieger, and R Hensley. The road to 2020 and beyond : What is driving the global automotive industry. *McKinsey&Company (Pub.)*, *Automotive & Assembly–Latest thinking, available online*, 28(3) :2014, 2013. <http://www.mckinsey.com>.
- [15] Roberto Baldessari, Bert Bodekker, Matthias Deegener, Andreas Festag, Walter Franz, C Christopher Kellum, Timo Kosch, Andras Kovacs, Massimiliano Lenardi, Cornelius Menig, et al. Car-2-car communication consortium-manifesto. 2007.
- [16] Rudolf Mietzner. CVIS-cooperative vehicle-infrastructure systems. *COM Safety : Newsletter for European ITS Related Research Projects*, 3(5), 2007.
- [17] Hannes Hartenstein, Bernd Bochow, André Ebner, Matthias Lott, Markus Radimirsch, and Dieter Vollmer. Position-aware ad hoc wireless networks for inter-vehicle communications : the fleetnet project. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 259–262. ACM, 2001.
- [18] A Festag, G Noecker, M Strassberger, A Lubke, B Bochow, M Torrent-Moreno, S Schnauffer, R Eigner, C Catrinescu, and J Kunisch. NoW–network on wheels : Project objectives, technology and achievements. 2008.
- [19] Shouzhi Xu, Pengfei Guo, Bo Xu, and Huan Zhou. Study on QoS of video communication over VANET. In *Information Computing and Applications*, pages 730–738. Springer, 2012.
- [20] Akhtar Husain and SC Sharma. Simulated analysis of location and distance based routing in VANET with IEEE 802. 11p. *Procedia Computer Science*, 57 :323–331, 2015.
- [21] Shouzhi Xu, Pengfei Guo, Bo Xu, and Huan Zhou. QoS evaluation of VANET routing protocols. *Journal of Networks*, 8(1) :132–139, 2013.
- [22] Farahnaz Naeimipoor, Cristiano Rezende, and Azzedine Boukerche. Performance evaluation of video dissemination protocols over vehicular networks. In *Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops), 2012 IEEE 37th Conference on*, pages 694–701. IEEE, 2012.

- [23] Barakat Pravin Maratha, Tarek R Sheltami, and Khaled Salah. Performance study of MANET routing protocols in VANET. *Arabian Journal for Science and Engineering*, pages 1–12, 2016.
- [24] Hamssa Hasrouny, Abed Ellatif Samhat, Carole Bassil, and Anis Laouiti. VANET security challenges and solutions : A survey. *Vehicular Communications*, 2017.
- [25] C Kumuthini and P Krishnakumari. Evolving intuitionistic fuzzy priority classifier with bio-inspiration based scheduling scheme for WiMAX in vehicular ad-hoc networks. *Wireless Networks*, 22(2) :403–415, 2016.
- [26] Saurabh D Patil, DV Thombare, and Vaishali D Khairnar. Simulation of realistic mobility model and implementation of 802.11 p (DSRC) for vehicular networks (VANET). *arXiv preprint arXiv :1304.5190*, 2013.
- [27] Bertrand Ducourthial. About efficiency in wireless communication frameworks on vehicular networks. In *The First International Workshop on Wireless Networking for Intelligent Transportation Systems*, page 3. ACM, 2007.
- [28] Fangchun Yang, Shangguang Wang, Jinglin Li, Zhihan Liu, and Qibo Sun. An overview of internet of vehicles. *China Communications*, 11(10) :1–15, 2014.
- [29] Raju Barskar and Meenu Chawla. Vehicular ad hoc networks and its applications in diversified fields. *International Journal of Computer Applications*, 123(10), 2015.
- [30] Jean-Pierre Hubaux, Srdjan Capkun, and Jun Luo. The security and privacy of smart vehicles. *IEEE Security & Privacy*, 2(3) :49–55, 2004.
- [31] Der-Jiunn Deng, Hsin-Chin Chen, Han-Chieh Chao, and Yueh-Min Huang. A collision alleviation scheme for IEEE 802.11 p VANETs. *Wireless Personal Communications*, 56(3) :371–383, 2011.
- [32] IEEE 802.11 n Working Group et al. Draft amendment to standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan networks-specific requirements-part 11 : Wireless lan medium access control and physical layer specifications : Enhancements for higher throughput. *IEEE P802. 11n/D1. 0*, 2006.
- [33] Tim Weil. Wireless access in vehicular environments (wave)-the emerging ieee 1609 standard, 2007.
- [34] Jijun Yin, Tamer ElBatt, Gavin Yeung, Bo Ryu, Stephen Habermas, Hariharan Krishnan, and Timothy Talty. Performance evaluation of safety applications over dsrc vehicular ad hoc networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 1–9. ACM, 2004.
- [35] Katrin Bilstrup, Elisabeth Uhlemann, ErikG Ström, and Urban Bilstrup. On the ability of the 802.11 p mac method and stdma to support real-time vehicle-to-vehicle communication. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009(1) :902414, 2009.

- [36] Yunxin Li. *An Overview of the DSRC/WAVE Technology*, pages 544–558. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [37] Sherali Zeadally, Ray Hunt, Yuh-Shyan Chen, Angela Irwin, and Aamir Hassan. Vehicular ad hoc networks (VANETS) : status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 50(4) :217–241, 2012.
- [38] Wassim Ramadan. *Amélioration de la transmission de contenus vidéo et de données dans les réseaux sans-fil*. PhD thesis, Besançon, 2011.
- [39] Santiago Gonzalez, Wilder Castellanos, Paola Guzman, Pau Arce, and Juan Carlos Guerri. Simulation and experimental testbed for adaptive video streaming in ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 52 :89–105, 2016.
- [40] Hualu Wang, Ajay Divakaran, Anthony Vetro, Shih-Fu Chang, and Huifang Sun. Survey of compressed-domain features used in audio-visual indexing and analysis. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 14(2) :150–183, 2003.
- [41] Frank HP Fitzek and Martin Reisslein. MPEG-4 and H.263 video traces for network performance evaluation. *IEEE network*, 15(6) :40–54, 2001.
- [42] Feng Xu and Yu-Jin Zhang. Evaluation and comparison of texture descriptors proposed in MPEG-7. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 17(4) :701–716, 2006.
- [43] Nihal HA Mohammed, Heba N El-Moafy, Salah M Abdel-Mageid, and Mahmoud I Marie. Mobility management scheme based on smart buffering for vehicular networks. *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 4(2) :35–46, 2017.
- [44] Amit Dua, Neeraj Kumar, and Seema Bawa. A systematic review on routing protocols for vehicular ad hoc networks. *Vehicular Communications*, 1 :33–52, 2014.
- [45] S Mohapatra and P Kanungo. Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV routing protocols using NS2 simulator. *Procedia Engineering*, 30 :69–76, 2012.
- [46] Sabrina Nefti and Maamar Sedrati. PSNR and jitter analysis of routing protocols for video streaming in sparse MANET networks, using NS2 and the evalvid framework. *arXiv preprint arXiv :1604.03217*, 2016.
- [47] Baraa T Sharef, Raed A Alsaqour, and Mahamod Ismail. Comparative study of variant position-based VANET routing protocols. *Procedia Technology*, 11 :532–539, 2013.
- [48] Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, and Driss Aboutajdine. An evaluation of routing protocols for vehicular ad-hoc network considering the video stream. *Wireless Personal Communications*, 98(1) :945–981, 2018.

- [49] Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, and Driss Aboutajdine. Vehicular ad-hoc network : Evaluation of QoS and QoE for multimedia application. In *International Conference on Networked Systems*, pages 367–371. Springer, 2016.
- [50] Nadia N Qadri, Martin Fleury, Bijan Rahimzadeh Rofoee, Muhammad Altaf, and Mohammed Ghanbari. Robust P2P multimedia exchange within a VANET. *Wireless Personal Communications*, 63(3) :561–577, 2012.
- [51] Francisco J Martinez, Manuel Fogue, Chai-Keong Toh, Juan-Carlos Cano, Carlos T Calafate, and Pietro Manzoni. Computer simulations of VANETs using realistic city topologies. *Wireless Personal Communications*, 69(2) :639–663, 2013.
- [52] Shie-Yuan Wang, Po-Fan Wang, Yu-Wei Li, and Lee-Chin Lau. Design and implementation of a more realistic radio propagation model for wireless vehicular networks over the NCTUns network simulator. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE*, pages 1937–1942. IEEE, 2011.
- [53] Brijesh Kumar Chaurasia, Ranjeet Singh Tomar, Shekhar Verma, and Geetam Singh Tomar. Suitability of MANET routing protocols for vehicular ad hoc networks. In *Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2012 International Conference on*, pages 334–338. IEEE, 2012.
- [54] Ch Sudersan Raju, M Sailaja, and C Balaswamy. Adaptability of MANET routing protocols for VANETs. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2, 2013.
- [55] Charles E Perkins and Elizabeth M Royer. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications*, page 90. IEEE Computer Society, 1999.
- [56] David B Johnson and David A Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile computing*, pages 153–181. Springer, 1996.
- [57] Ian Chakeres and Charles Perkins. Dynamic MANET on-demand (DYMO) routing. *draft-ietf-manet-dymo-14 (work in progress)*, 2008.
- [58] Charles E Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 24, pages 234–244. ACM, 1994.
- [59] Guangyu Pei, Mario Gerla, and Tsu-Wei Chen. Fisheye state routing : A routing scheme for ad hoc wireless networks. In *Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 70–74. IEEE, 2000.
- [60] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Cédric Adjih, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Amir Qayyum, and Laurent Viennot. Optimized link state routing protocol (OLSR). 2003.

- [61] Zygmunt J Haas and Marc R Pearlman. ZRP : a hybrid framework for routing in ad hoc networks. In *Ad hoc networking*, pages 221–253. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001.
- [62] Brad Karp and Hsiang-Tsung Kung. GPSR : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 243–254. ACM, 2000.
- [63] Mohammad Al-Rabayah and Robert Malaney. A new scalable hybrid routing protocol for VANETs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(6) :2625–2635, 2012.
- [64] Jing Zhao and Guohong Cao. VADD : Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE transactions on vehicular technology*, 57(3) :1910–1922, 2008.
- [65] May Sayed A Nouh, Salwa H El-ramly, M Zaki, and Husein AA Elsayed. Enhanced route discovery mechanism of ad-hoc on demand distance vector for MANET. *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 3(6) :129–138, 2016.
- [66] Sanjeev Kumar Sharma and Sanjay Sharma. Improvement over AODV considering QoS support in mobile ad-hoc networks. *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 4(2) :47–61, 2017.
- [67] Vinod Namboodiri, Manish Agarwal, and Lixin Gao. A study on the feasibility of mobile gateways for vehicular ad-hoc networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 66–75. ACM, 2004.
- [68] Jonathan Billington and Cong Yuan. *On modelling and analysing the dynamic MANET on-demand (DYMO) routing protocol*. Springer, 2009.
- [69] Gyanappa A Walikar and Rajashekar C Biradar. A survey on hybrid routing mechanisms in mobile ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 77 :48–63, 2017.
- [70] Kayhan Zrar Ghafoor, Jaime Lloret, Kamalrulnizam Abu Bakar, Ali Safa Sadiq, and Sofian Ali Ben Mussa. Beaconing approaches in vehicular ad hoc networks : a survey. *Wireless personal communications*, 73(3) :885–912, 2013.
- [71] Joao Goncalves Filho, Ahmed Patel, Bruno Lopes Alcantara Batista, and Joaquim Celestino. A systematic technical survey of DTN and VDTN routing protocols. *Computer Standards & Interfaces*, 48 :139–159, 2016.
- [72] Chenn-Jung Huang, Yu-Wu Wang, Heng-Ming Chen, Ai-Lin Cheng, Jui-Jiun Jian, Han-Wen Tsai, and Jia-Jian Liao. An adaptive multimedia streaming dissemination system for vehicular networks. *Applied Soft Computing*, 13(12) :4508–4518, 2013.

- [73] David Rodrigues, Eduardo Cerqueira, and Edmundo Monteiro. Quality of service and quality of experience in video streaming. In *Proc. of the International Workshop on Traffic Management and Traffic Engineering for the Future Internet (FI-TraMEEn2008)*, EuroNF NoE, Porto, Portugal, pages 11–12, 2008.
- [74] Maurizio A Bonuccelli, Gaetano Giunta, Francesca Lonetti, and Francesca Martelli. Real-time video transmission in vehicular networks. *Mobile Networking for Vehicular Environments*, pages 115–120, 2007.
- [75] Fei Xie, Kien Hua, Wenjing Wang, Yao H Ho, et al. Performance study of live video streaming over highway vehicular ad hoc networks. In *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th*, pages 2121–2125. IEEE, 2007.
- [76] Ismail Bennis. *Contribution aux protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil : Application à la supervision agricole*. PhD thesis, Reims, 2015.
- [77] Stefan Winkler, Animesh Sharma, and David McNally. Perceptual video quality and blockiness metrics for multimedia streaming applications. In *Proceedings of the international symposium on wireless personal multimedia communications*, pages 547–552, 2001.
- [78] Yanjiao Chen, Kaishun Wu, and Qian Zhang. From QoS to QoE : A tutorial on video quality assessment. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2) :1126–1165, 2015.
- [79] Elisangela Aguiar, André Riker, Antonio Abelèm, Eduardo Cerqueira, and Mu Mu. Video quality estimator for wireless mesh networks. In *Proceedings of the 2012 IEEE 20th International Workshop on Quality of Service*, page 1. IEEE Press, 2012.
- [80] Mu Mu, Piotr Romaniak, Andreas Mauthe, Mikolaj Leszczuk, Lucjan Janowski, and Eduardo Cerqueira. Framework for the integrated video quality assessment. *Multimedia Tools and Applications*, 61(3) :787–817, 2012.
- [81] Shyamprasad Chikkerur, Vijay Sundaram, Martin Reisslein, and Lina J Karam. Objective video quality assessment methods : A classification, review, and performance comparison. *IEEE transactions on broadcasting*, 57(2) :165–182, 2011.
- [82] Zhou Wang, Alan Conrad Bovik, Hamid Rahim Sheikh, and Eero P Simoncelli. Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 13(4) :600–612, 2004.
- [83] MSU Graphics. Media lab. msu video quality measurement tool, 2009.
- [84] ITUT REC. P. 800.1, mean opinion score (MOS) terminology, 2006.
- [85] Teerawat Issariyakul and Ekram Hossain. *Introduction to network simulator NS2*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [86] Xinjie Chang. Network simulations with opnet. In *Simulation Conference Proceedings, 1999 Winter*, volume 1, pages 307–314. IEEE, 1999.

- [87] Qualnet network simulator. <http://www.scalable-networks.com/>.
- [88] Saurabh Mehta, Niamat Ullah, Md Humaun Kabir, Mst Najnin Sultana, and Kyung Sup Kwak. A case study of networks simulation tools for wireless networks. In *Modelling & Simulation, 2009. AMS'09. Third Asia International Conference on*, pages 661–666. IEEE, 2009.
- [89] P Anelli and E Horlait. Ns-2 : Principes de conception et d'utilisation. *Disponible : www-sop.inria.fr/rodeo/personnel/Pierre.Ansel/Manuel\_LNS*, 1, 1999.
- [90] Mariam Dawoud. Analyse du protocole aodv. *DEA Memory Presented in Libanaise University*, 2006.
- [91] Rahul Mangharam, Daniel S Weller, Daniel D Stancil, Rangunathan Rajkumar, and Jayendra S Parikh. Groovesim : a topography-accurate simulator for geographic routing in vehicular networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 59–68. ACM, 2005.
- [92] Michal Piorkowski, Maxim Raya, A Lezama Lugo, Panagiotis Papadimitratos, Matthias Grossglauser, and J-P Hubaux. Trans : realistic joint traffic and network simulator for vanets. *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, 12(1) :31–33, 2008.
- [93] Khaled Ibrahim and Michele C Weigle. Ash : Application-aware swans with highway mobility. In *INFOCOM Workshops 2008, IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [94] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, and Daniel Krajzewicz. Sumo-simulation of urban mobility : an overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind, 2011.
- [95] Francisco J Martinez, J-C Cano, Carlos T Calafate, and Pietro Manzoni. Citymob : a mobility model pattern generator for vanets. In *Communications Workshops, 2008. ICC Workshops' 08. IEEE International Conference on*, pages 370–374. IEEE, 2008.
- [96] Jérôme Härri, Fethi Filali, Christian Bonnet, and Marco Fiore. Vanetmobisim : generating realistic mobility patterns for vanets. In *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 96–97. ACM, 2006.
- [97] Xiang Zeng, Rajive Bagrodia, and Mario Gerla. Glomosim : a library for parallel simulation of large-scale wireless networks. In *Parallel and Distributed Simulation, 1998. PADS 98. Proceedings. Twelfth Workshop on*, pages 154–161. IEEE, 1998.
- [98] David R Choffnes and Fabián 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*, pages 69–78. ACM, 2005.
- [99] Zygmunt J Haas and Rimón Barr. Density-independent, scalable search in ad hoc networks. *International Journal of Wireless Information Networks*, 14(2) :93–105, 2007.

- [100] Md Habibur Rahman, Md Monzur Morshed, and Meftah Ur Rahman. Realistic vehicular mobility impact of ftm, idm, idm-im and idm-lc on vanets. *International Journal of Computer Applications*, 90(11), 2014.
- [101] Jérôme Härrri, Marco Fiore, Fethi Filali, and Christian Bonnet. Vehicular mobility simulation with vanetmobisim. *Simulation*, 87(4) :275–300, 2011.
- [102] Mario De Felice, Eduardo Cerqueira, Adalberto Melo, Mario Gerla, Francesca Cuomo, and Andrea Baiocchi. A distributed beaconless routing protocol for real-time video dissemination in multimedia VANETs. *Computer Communications*, 58 :40–52, 2015.
- [103] Joon-Sang Park, Uichin Lee, and Mario Gerla. Vehicular communications : emergency video streams and network coding. *Journal of Internet Services and Applications*, 1(1) :57–68, 2010.
- [104] Artur Ziviani, Bernd E Wolfinger, José F De Rezende, Otto Carlos MB Duarte, and Serge Fdida. Joint adoption of QoS schemes for MPEG streams. *Multimedia tools and applications*, 26(1) :59–80, 2005.
- [105] Daniel Jiang and Luca Delgrossi. IEEE 802.11 p : Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pages 2036–2040. IEEE, 2008.
- [106] Saima Zafar and HTM Manzoor. Throughput and delay analysis of AODV, DSDV and DSR routing protocols in mobile ad hoc networks. *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 3(2) :1–7, 2016.
- [107] Christos Bouras, Vaggelis Kapoulas, and Enea Tsanai. A GPSR enhancement mechanism for routing in VANETs. In *International Conference on Wired/Wireless Internet Communication*, pages 94–107. Springer, 2015.
- [108] Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, and Said El Alaoui Ouatik. Improvement of GPSR protocol by using future position estimation of participating nodes in vehicular ad-hoc networks. In *Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), International Conference*, pages 87–94. IEEE, 2016.
- [109] Tianli Hu, Minghui Liwang, Lianfen Huang, and Yuliang Tang. An enhanced GPSR routing protocol based on the buffer length of nodes for the congestion problem in VANETs. In *Computer Science & Education (ICCSE), 10th International Conference*, pages 416–419. IEEE, 2015.
- [110] Jiazi Yi, Asmaa Adnane, Sylvain David, and Benoit Parrein. Multipath optimized link state routing for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 9(1) :28–47, 2011.
- [111] Baraa T Sharef, Raed A Alsaqour, and Mahamod Ismail. Comparative study of variant position-based VANET routing protocols. *Procedia Technology*, 11 :532–539, 2013.

- [112] Seung-Chul M Woo and Suresh Singh. Scalable routing protocol for ad hoc networks. *Wireless Networks*, 7(5) :513–529, 2001.
- [113] Jinyang Li, John Jannotti, Douglas SJ De Couto, David R Karger, and Robert Morris. A scalable location service for geographic ad hoc routing. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 120–130. ACM, 2000.
- [114] Yong Liu, Xuhui Hu, Myung J Lee, and Tarek N Saadawi. A region-based routing protocol for wireless mobile ad hoc networks. *IEEE network*, 18(4) :12–17, 2004.
- [115] Stefano Basagni, Imrich Chlamtac, Violet R Syrotiuk, and Barry A Woodward. A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM). In *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 76–84. ACM, 1998.
- [116] Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, and Mohammed Oumsis. An improved GPSR protocol to enhance the video quality transmission over vehicular ad hoc networks. In *Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), 2016 International Conference on*, pages 146–153. IEEE, 2016.
- [117] Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, and Mohammed Oumsis. A new improved GPSR (GPSR-kP) routing protocol for multimedia communication over vehicular ad hoc network. In *Proceedings of the International Conference on Big Data and Advanced Wireless Technologies*, page 14. ACM, 2016.
- [118] Sungoh Kwon and Ness B Shroff. Geographic routing in the presence of location errors. *Computer Networks*, 50(15) :2902–2917, 2006.
- [119] Rahul C Shah, Adam Wolisz, and Jan M Rabaey. On the performance of geographical routing in the presence of localization errors [ad hoc network applications]. In *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on*, volume 5, pages 2979–2985. IEEE, 2005.
- [120] Sandeep Kaur and Kamaljit Kaur. An new improved GPSR (I-GPSR) routing protocol for VANET. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 2(7), 2016.
- [121] C Bouras, V Kapoulas, and E Tsanai. A GPSR enhancement mechanism for routing in VANETs. In *Wired/Wireless Internet Communications*, pages 94–107. Springer, 2015.
- [122] Azzedine Boukerche, DANIEL C AAMARA, Antonio AF Loureiro, and CARLOS MS FIGUEIREDO. Algorithms for mobile ad hoc networks. *Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks*, page 1, 2009.
- [123] Ram Ramanathan and Regina Rosales-Hain. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 2, pages 404–413. IEEE, 2000.

- [124] Hideaki Takagi and Leonard Kleinrock. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals. *IEEE Transactions on communications*, 32(3) :246–257, 1984.
- [125] Seyed Hossein Hosseini Nazhad Ghazani. Algorithms for mobile ad hoc networks. In *Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2013 7th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2013.
- [126] Gregory G Finn. Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetworks. Technical report, DTIC Document, 1987.
- [127] Lars Wischhof, André Ebner, and Hermann Rohling. Information dissemination in self-organizing intervehicle networks. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 6(1) :90–101, 2005.
- [128] Godfried T Toussaint. The relative neighbourhood graph of a finite planar set. *Pattern recognition*, 12(4) :261–268, 1980.
- [129] K Ruben Gabriel and Robert R Sokal. A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic zoology*, 18(3) :259–278, 1969.
- [130] Boris Aronov, Muriel Dulieu, and Ferran Hurtado. Witness gabriel graphs. *Computational Geometry*, 46(7) :894–908, 2013.
- [131] Mouna Rekik. *Routage géographique multi-chemin basé sur l’intelligence d’essaim pour réseaux de capteurs et d’actionneurs sans fil : Application aux Smart Grids*. PhD thesis, Université Lille 1 ; Université de Sfax, 2016.
- [132] Christian Lochert, Martin Mauve, Holger Fubler, and Hannes Hartenstein. Geographic routing in city scenarios mobicom 2004 poster abstract, 2005.
- [133] Moez Jerbi, S-M Senouci, Rabah Meraihi, and Yacine Ghamri-Doudane. An improved vehicular ad hoc routing protocol for city environments. In *Communications, 2007. ICC’07. IEEE International Conference on*, pages 3972–3979. IEEE, 2007.
- [134] Sunder Aditya Rao, Manohara Pai, Mounir Bousedjra, and Joseph Mouzna. GPSR-L : Greedy perimeter stateless routing with lifetime for VANETs. In *ITS Telecommunications, 2008. ITST 2008. 8th International Conference on*, pages 299–304. IEEE, 2008.
- [135] Lili Hu, Zhizhong Ding, and Huijing Shi. An improved GPSR routing strategy in VANET. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2012 8th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2012.
- [136] Christian Lochert, Hannes Hartenstein, Jing Tian, Holger Fussler, Dagmar Hermann, and Martin Mauve. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings. IEEE*, pages 156–161. IEEE, 2003.

- [137] Raed Alsaqour, Maha Abdelhaq, Rashid Saeed, Mueen Uddin, Ola Alsukour, Mohammed Al-Hubaishi, and Tariq Alahdal. Dynamic packet beaconing for GPSR mobile ad hoc position-based routing protocol using fuzzy logic. *Journal of Network and Computer Applications*, 47 :32–46, 2015.
- [138] Sandeep Kaur and Kamaljit Kaur. An new improved gpsr (i-gpsr) routing protocol for vanet. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 2(7), 2016.
- [139] V Shanthi and D Somasundareswari. An efficient coverage greedy packet stateless routing (ec-gpsr) in authenties based wireless sensor networks. *Circuits and Systems*, 7(14) :4291, 2016.
- [140] Kumari Monika and A Sharma. A deterministic GPSR routing protocol for VANET. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 2 :1–5, 2016.
- [141] Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, Said El, and Alaoui Ouatik. GPSR + Predict : An Enhancement for GPSR to Make Smart Routing Decision by Anticipating Movement of Vehicles in VANETs. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2(3) :137–146, 2017.
- [142] Baraa T Sharef, Raed A Alsaqour, and Mahamod Ismail. Comparative study of variant position-based VANET routing protocols. *Procedia Technology*, 11 :532–539, 2013.
- [143] Mohammad Reza Jabbarpour, Alireza Marefat, Ali Jalooli, Rafidah Md Noor, Rashid Hafeez Khokhar, and Jaime Lloret. Performance analysis of V2V dynamic anchor position-based routing protocols. *Wireless Networks*, 21(3) :911–929, 2015.
- [144] Mani Zarei, Amir Masoud Rahmani, and Hossein Samimi. Connectivity analysis for dynamic movement of vehicular ad hoc networks. *Wireless Networks*, pages 1–16, 2016.
- [145] Jianqi Liu, Jiafu Wan, Qinruo Wang, Pan Deng, Keliang Zhou, and Yupeng Qiao. A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks. *Telecommunication Systems*, 62(1) :15–30, 2016.
- [146] Lotfi Asker Zadeh. Fuzzy logic. 1988.
- [147] Abdelali Boushaba, Adil Benabbou, Rachid Benabbou, Azeddine Zahi, and Mohammed Oumsis. Intelligent multipath optimized link state routing protocol for QoS and QoE enhancement of video transmission in MANETs. In *Networked Systems*, pages 230–245. Springer, 2014.
- [148] Shu-Yin Chiang and Jing-Long Wang. Routing analysis using fuzzy logic systems in wireless sensor networks. In *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, pages 966–973. Springer, 2008.

- [149] Rashid Hafeez Khokhar, Rafidah Md Noor, Kayhan Zrar Ghafoor, Chih-Heng Ke, and Md Asri Ngadi. Fuzzy-assisted social-based routing for urban vehicular environments. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011(1) :178, 2011.
- [150] Celimuge Wu, Satoshi Ohzahata, and Toshihiko Kato. Flexible, portable, and practicable solution for routing in VANETs : a fuzzy constraint q-learning approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(9) :4251–4263, 2013.
- [151] Ali Calhan. A fuzzy logic based clustering strategy for improving vehicular ad-hoc network performance. *Sadhana*, 40(2) :351–367, 2015.
- [152] Celimuge Wu, Tsutomu Yoshinaga, Yusheng Ji, Tutomu Murase, and Yan Zhang. A reinforcement learning-based data storage scheme for vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7) :6336–6348, 2017.
- [153] Thanachai Thumthawatworn, Piyakul Tillapart, and Pratit Santiprabhob. Adaptive multi-fuzzy engines for handover decision in heterogeneous wireless networks. *Wireless Personal Communications*, 93(4) :1005–1026, 2017.
- [154] Attada Venkataramana and S Pallam Setty. Enhance the quality of service in mobile ad hoc networks by using fuzzy based ntt-dymo. *Wireless Personal Communications*, 95(3) :2989–3002, 2017.
- [155] Abdelali Boushaba, Adil Benabbou, Rachid Benabbou, Azeddine Zahi, and Mohamed Oumsis. Multi-point relay selection strategies to reduce topology control traffic for OLSR protocol in MANETs. *Journal of Network and Computer Applications*, 53 :91–102, 2015.
- [156] Jin Zhao and Bimal K Bose. Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive. In *IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]*, volume 1, pages 229–234. IEEE, 2002.
- [157] Michio Sugeno. An introductory survey of fuzzy control. *Information sciences*, 36(1) :59–83, 1985.
- [158] Lotfi A Zadeh. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3) :338–353, 1965.
- [159] Marcian Cirstea, Andrei Dinu, Malcolm McCormick, and Jeen Ghee Khor. *Neural and fuzzy logic control of drives and power systems*. Newnes, 2002.
- [160] Shin-ichi Horikawa, Takeshi Furuhashi, Shigeru Okuma, and Yoshiki Uchikawa. Composition methods of fuzzy neural networks. In *Industrial Electronics Society, 1990. IECON'90., 16th Annual Conference of IEEE*, pages 1253–1258. IEEE, 1990.
- [161] Ebrahim H Mamdani. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 121(12) :1585–1588, 1974.

- [162] Francesco Camastra, Angelo Ciaramella, Valeria Giovannelli, Matteo Lener, Valentina Rastelli, Antonino Staiano, Giovanni Staiano, and Alfredo Starace. A fuzzy decision system for genetically modified plant environmental risk assessment using mamdani inference. *Expert Systems with Applications*, 42(3) :1710–1716, 2015.
- [163] Rezaei Mohammad, Asadizadeh Mostafa, Majdi Abbas, and Hossaini Mohammad Farouq. Prediction of representative deformation modulus of longwall panel roof rock strata using Mamdani fuzzy system. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1) :23–30, 2015.
- [164] Md Habibur Rahman, Md Monzur Morshed, and Meftah Ur Rahman. Realistic vehicular mobility impact of FTM, IDM, IDM-IM and IDM-LC on VANETs. *International Journal of Computer Applications*, 90(11), 2014.
- [165] Rafael Cacheda, Daniel Garcia, Antonio Cuevas, Francisco Castano, Javier Sanchez, Georgios Koltsidas, Vincenzo Mancuso, José Novella, Seounghoon Oh, and Antonio Panto. QoS requirements for multimedia services. *Resource Management in Satellite Networks*, pages 67–94, 2007.
- [166] Imran Khan and Amir Qayyum. Performance evaluation of aodv and olsr in highly fading vehicular ad hoc network environments. In *Multitopic Conference, 2009. INMIC 2009. IEEE 13th International*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [167] Kevin C Lee, Jérôme Härri, Uichin Lee, and Mario Gerla. Enhanced perimeter routing for geographic forwarding protocols in urban vehicular scenarios. In *Globecom Workshops, 2007 IEEE*, pages 1–10. IEEE, 2007.
- [168] Carolina Tripp Barba, Luis Urquiza Aguiar, and Monica Aguilar Igartua. Design and evaluation of GBSR-B, an improvement of GPSR for VANETs. *IEEE Latin America Transactions*, 11(4) :1083–1089, 2013.
- [169] Carolina Tripp-Barba, Luis Urquiza-Aguiar, Mónica Aguilar Igartua, David Rebollo-Monedero, Luis J de la Cruz Llopis, Ahmad Mohamad Mezher, and José Alfonso Aguilar-Calderón. A multimetric, map-aware routing protocol for VANETs in urban areas. *Sensors*, 14(2) :2199–2224, 2014.
- [170] Yun Chen, Changle Li, Xiaolei Han, Mingyu Gao, and Lina Zhu. A reliable beaconless routing protocol for VANETs. In *Computer and Information Technology (CIT), 2014 IEEE International Conference on*, pages 94–99. IEEE, 2014.
- [171] Gen Li, Maode Ma, Chunfeng Liu, and Yantai Shu. Adaptive fuzzy multiple attribute decision routing in VANETs. *International Journal of Communication Systems*, 30(4), 2015.
- [172] Christos Bouras, Vaggelis Kapoulas, Nikos Stathopoulos, and Apostolos Gkamas. Mechanisms for enhancing the performance of routing protocols in VANETs. In *Proceedings of the 13th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks*, pages 11–18. ACM, 2016.

- [173] Kavita1 Prashant Gupta. A review on multipath vehicular ad hoc routing protocol (VANET) routing protocol.
- [174] Peter P Pham and Sylvie Perreau. Performance analysis of reactive shortest path and multipath routing mechanism with load balance. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, volume 1, pages 251–259. IEEE, 2003.
- [175] Wenjing Yang, Xinyu Yang, Shusen Yang, and Dongxu Yang. A greedy-based stable multi-path routing protocol in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 9(4) :662–674, 2011.
- [176] Samir Medjiah, Toufik Ahmed, and Abolghasem Hamid Asgari. Streaming multimedia over wmsns : an online multipath routing protocol. *International Journal of Sensor Networks*, 11(1) :10–21, 2012.
- [177] Pavlos Sermpezis, Georgios Koltsidas, and Fotini-Niovi Pavlidou. Investigating a junction-based multipath source routing algorithm for vanets. *IEEE Communications letters*, 17(3) :600–603, 2013.
- [178] Ismail Bennis, Hacene Fouchal, Ouadoudi Zytoune, and Driss Aboutajdine. Carrier sense aware multipath geographic routing protocol. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(9) :1109–1123, 2016.
- [179] Tianli Hu, Minghui LiWang, Lianfen Huang, and Yuliang Tang. A new multipath aodv routing protocol for vanet based on expected link lifetime. In *ICS*, pages 1516–1524, 2014.
- [180] Sumet Prabhavat, Hiroki Nishiyama, Nirwan Ansari, and Nei Kato. On load distribution over multipath networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(3) :662–680, 2012.
- [181] Jing Wu and Yuhao Wang. Performance study of multi-path in vanets and their impact on routing protocols. *Wireless Engineering and Technology*, 2(03) :125, 2011.
- [182] Tiger/line/circledr,. <http://www.census.gov/geo/www/tiger>.
- [183] Xu Li. Advances in vehicular ad hoc networking and applications. *International Journal of Distributed Sensor Networks.*, 2014.





---

## LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

### Article journal

1. Imane Zaimi, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, « Novel Optimized Strategy based on Multi Next-hops Election to Reduce Video Transmission Delay for GPSR Protocol over VANET ». Elsevier, Ad Hoc Networks. En cours de soumission.
2. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, « A Fuzzy Greedy Perimeter Stateless Routing Approach to Support Real-time Multimedia Transmission ». Springer, Wireless Networks (WINE). pp 1-23, 2018.
3. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, and Driss Aboutajdine, « An Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad-Hoc Network Considering the Video Stream ». Springer, Wireless Personal Communications, 98(1) pp 945-981, 2018.
4. Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, Said El Alaoui Ouatik. « Trade-off between Accuracy, Cost and QoS Using Beacon on Demand Strategy and Kalman Filtering Over VANET ». Digital Communication and Network (DCN),2017.
5. Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, Said El Alaoui Ouatik. « A Comparative Study of Routing Protocols Performance for Vehicular Ad-hoc Networks ». International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), pp 3867-3878, 2017.
6. Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, Said El Alaoui Ouatik. « GPSR+Predict : An Enhancement for GPSR to Make Smart Routing Decision by Anticipating Movement of Vehicles in VANET ». Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ), pp 137-146, 2017.

### Communication indexée

1. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis. « A New Improved GPSR (GPSR-kP) Routing Protocol for Multimedia Communication over Vehicular Ad-hoc Network ». ACM, In Proceedings of the International Conference on Big Data and Advanced Wireless Technologies (BDAW '16), New York, NY, USA, pp. 1-7, November, 2016.
2. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, « An improved GPSR protocol to enhance the video quality transmission over vehicular ad-hoc networks ». IEEE, on Wireless Networks and Mobile Communications (WIN-COM), International Conference, pp. 146-153, Octobre, 2016.
3. Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, and Said Ouatik, « Im-

provement of GPSR protocol by using future position estimation of participating nodes in vehicular ad-hoc Networks ». IEEE, on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), International Conference, pp. 87-94, Octobre, 2016.

4. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, and Driss Aboutajdine, « Vehicular Ad-Hoc Network : Evaluation of QoS and QoE for Multimedia Application », Springer, Lecture Notes In International Conference on Networked Systems, pp. 367-371, May, 2016.

### **Communication nationale et internationale**

1. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, Mohammed Oumsis, « Étude de l'impact de la charge et de la densité sur la QoS dans les réseaux VANET : Comparaison entre protocoles de routage basique et géographique ». 2ème Journées URAC'15 du Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunication (LRIT), 28 Novembre 2015 à Rabat.

2. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba and Mohammed Oumsis, « Nodes density and data traffic load impact on VANET routing protocols over IEEE 802.11/802.11p ». The Mediterranean Conference On Information and Communication Technologies (MedICT), 2015.

3. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini and Mohammed Oumsis ; « Étude de l'impact de la charge et de la densité sur la QoS dans les réseaux VANETs : Élargissement de la base de données des protocoles étudiés ». Les 5èmes Journées Doctorales en Technologies de l'Information et de la Communication (JDTIC'13), 29-30 Novembre 2013 à Kénitra.

4. Imane Zaimi and Mohammed Oumsis , « Étude de l'impact de la charge et de la densité sur la QoS dans les réseaux VANET : application aux protocoles de routage basique ». 2ème Journées URAC'13 du Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunication (LRIT), 31 Mai 2013 à Rabat.

## Résumé

L'optimisation du routage multimédia dans les réseaux VANET reçoit actuellement une attention considérable de la part des chercheurs dans ce domaine. En effet, l'utilisation des applications multimédia en général, et du service streaming en particulier, entraîne une croissance au niveau des attentes et des exigences des utilisateurs en termes d'efficacité. Autrement dit, la définition des besoins en termes de la qualité de service (QoS) et la qualité de l'expérience (QoE) est vivement sollicitée. Par conséquent, en raison de l'instabilité que connaît ce type de réseau, nous sommes convaincus que le recours à un protocole de routage fondé sur la QoS est une bonne alternative pour assurer une connectivité robuste entre les nœuds participants à la transmission. Ce travail de thèse s'inscrit sous forme d'une contribution à la recherche dans le domaine de l'optimisation du flux vidéo dans les réseaux VANET. Ainsi, nous avons proposé deux nouvelles approches: l'approche floue et l'approche multi-prochains-sauts.

Tout d'abord, une étude qualitative et quantitative a été réalisée dans le but d'évaluer dix protocoles de routage les plus représentatifs. Suite à laquelle, le protocole géographique GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) a été élu pour des éventuelles contributions suivies dans ce travail de thèse.

Notre première recommandation, appelée FzGR (Fuzzy Geographical Routing), est implémentée en deux parties. Chacune utilise une combinaison différente d'algorithmes de logique floue. FzGR a prouvé sa capacité à sélectionner, d'une manière intelligente, un meilleur prochain saut à partir de la mesure multi-contraintes calculée en temps réel.

Et afin d'exploiter au préalable la topologie du réseau, nous avons discuté un second nouvel algorithme de routage, appelé MNH-FGR (Multi Next Hop Fuzzy Geographical Routing). Celui-ci n'est que le résultat de l'implémentation de l'approche multi-sauts au protocole FzGR avec un processus d'équilibrage de charge. Le protocole MNH-FGR donne des résultats considérables et surpasse la performance de GPSR classique, de FzGR proposé, ainsi que celles d'autres variantes récentes tirées de la littérature.

**Mots clés :** VANET; Environnement urbain; Routage multimédia; Logique floue; QoS; QoE.