



N° Ordre :

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTÉ DES MATHÉMATIQUES ET DE L'INFORMATIQUE
Département d'informatique

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Informatique
Spécialité : Informatique

Par :
Salah GUESMIA

Thème

**Contribution à l'amélioration de la
communication véhiculaire pour mieux
supporter les applications de sûreté routière
dans les villes intelligentes**

Soutenue le : 24 Juin 2023

Devant le jury composé de :

M. Allaoua HEMMAK	MCA	Univ. de M'sila	Président
M. Fouzi SEMCHEDINE	Professeur	Univ. de Sétif 1	Rapporteur
M. Abderrahmane BAADACHE	Professeur	Univ. d'Alger 1	Examineur
M. Lamri SAYAD	MCA	Univ. de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022-2023

Je dédie ce travail :
À la mémoire de mon père
À ma famille
À mes amis

Remerciements

*"Louange à Allah, Seigneur de l'univers.
Le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux."*

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse M. Fouzi SEMCHEDINE, Professeur à l'université de Sétif 1. Je tiens à le remercier vivement pour son soutien inconditionnel, ses conseils et son orientation.

Mes sincères reconnaissances et remerciements vont à M. Allaoua HEMMAK, MCA à l'université de M'sila, M. Abderrahmane BAADACHE, Professeur à l'université d'Alger 1 et à M. Lamri SAYAD, MCA à l'université de M'sila, de m'avoir fait l'honneur d'être membres de jury de cette thèse.

Je dois une vive reconnaissance à M. Soufiene DJAHEL, Professeur à l'université de Huddersfield. Je tiens à le remercier sincèrement pour m'avoir suivi, guidé et encouragé tout au long de ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à mes collègues et partenaires de travail et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ces travaux de thèse. Ma gratitude s'adresse particulièrement à M. Boubakeur MOUSSAOUI de l'université de Bordj Bou Arreridj.

Enfin, un immense merci à ma chère maman Zineb, mon épouse Halima, mes enfants (Djawad, Souad et Mohammed-Rachad), mes sœurs et frères et à tous les membres de ma famille pour leur irremplaçable et inconditionnel soutien, leur confiance en moi et leurs encouragements sans faille. Cette thèse est un peu la leur aussi.

Merci.

ملخص

يعتمد تطوير المدن الذكية بشكل أساسي على تقنيات المعلومات والاتصال المتطورة والواسعة الانتشار لمراقبة موجودات المدينة ، مثل المتعلقة بالطاقة والمياه والبنية التحتية للنقل ، وذلك لتحسين نوعية حياة المواطنين. في سياق إدارة النقل ، الهدف هو تحديد ودعم وسائل النقل المستدامة وتطوير أنظمة النقل الذكية بناءً على المعلومات اللحظية لتحسين السلامة على الطرق ، وإدارة حركة المرور بكفاءة ، وبالتالي تقليل انبعاثات الغاز واستهلاك الطاقة ، وكذلك توفير خدمات الراحة للمستخدمين. يعد النموذج الناشئ لنظام المركبات المتصلة والمستقلة بتحسين كبير في مراقبة الازدحام المروري والتخفيف من حدته بالإضافة إلى ضمان سلامة عالية أثناء مناورات المركبات المختلفة مثل تغيير المسار والتجاوز وما إلى ذلك.

في هذا السياق ، تهدف أطروحة الدكتوراه هذه إلى تطوير تقنيات مبتكرة لتحسين موثوقية نشر الرسائل ، التي تبثها المركبات مشكلة بذلك شبكة ، للإعلان عن المواقع الخطرة أثناء حدوث طارئ ، مثل حوادث المرور والكبح في حالات الطوارئ ، مع تقليل تأخير نشر الرسائل والتقليل أيضاً من عمليات إعادة الإرسال غير الضرورية.

كلمات مفتاحية :

ازدحام الشبكة ، البث متعدد القفزات ، تطبيقات الأمن والسلامة على الطرق ، البيئة الحضرية ، المركبات المتصلة والمستقلة ، أنظمة النقل الذكية ، المدن الذكية.

Abstract

The development of smart cities is mainly based on ubiquitous and advanced information and communication technologies (ICT) to monitor city assets, such as energy, water, and transportation infrastructure, to improve the quality of life of citizens. In the context of transportation management, the objective is to identify and support sustainable transportation modes and develop intelligent transportation systems (ITS) based on real-time information to improve road safety, efficiently manage traffic, thereby reducing gas emissions and energy consumption, and also provide comfort services to users. The emerging paradigm of connected and autonomous vehicle system (known as Vehicular Ad-hoc NETWORK (VANET)) promises substantial improvement in traffic congestion control and mitigation as well as very high safety during various vehicle maneuvers such as lane changing, passing, etc.

In this context, this Ph.D. thesis aims at developing innovative techniques to improve the reliability of the dissemination of messages, broadcast by vehicles forming a VANET network, announcing dangerous situations during an emergency event, such as accidents and emergency braking, while reducing end-to-end transmission delays and minimizing unnecessary retransmissions.

Key Words : Network congestion, Multi-hop broadcasting, Safety applications, Urban environment, Connected and autonomous vehicles (CAVs), Intelligent transportation systems (ITS), Smart cities.

Résumé

Le développement des villes intelligentes s'appuie principalement sur des technologies omniprésentes et avancées de l'information et de la communication pour contrôler les actifs de la ville, tels que l'énergie, l'eau et les infrastructures de transport, afin d'améliorer la qualité de vie des citoyens. Dans le contexte de la gestion des transports, l'objectif est d'identifier et de soutenir les modes de transport durables et de développer des systèmes de transport intelligents basés sur des informations en temps réel afin d'améliorer la sûreté routière, de gérer efficacement le trafic, réduisant ainsi les émissions de gaz et la consommation d'énergie, et également de fournir des services de confort aux usagers. Le paradigme émergent du système de véhicules connectés et autonomes (connus sous le nom de VANET) promet une amélioration substantielle du contrôle et de l'atténuation de la congestion routière ainsi qu'une sécurité très élevée lors des diverses manœuvres de véhicules telles que le changement de la voie, le dépassement, etc.

Dans ce contexte, cette thèse de doctorat vise à développer des techniques innovantes pour améliorer la fiabilité de la dissémination des messages, diffusés par les véhicules formant un réseau de type VANET, annonçant des situations dangereuses lors d'un événement d'urgence, tels que les accidents et le freinage d'urgence, tout en réduisant les délais de transmission de bout en bout et minimiser les retransmissions inutiles.

Mots Clés : Congestion du réseau, Diffusion multi-sauts, Applications de sûreté routière, Milieu urbain, Véhicules connectés et autonomes, Systèmes de transport intelligents, Villes intelligentes.

Table des matières

Table des matières	vi
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des abréviations	xii
Introduction générale	1
Contributions	2
Organisation du manuscrit	4
I État de l’art	6
1 Vue d’ensemble des réseaux véhiculaires	7
1.1 Introduction	7
1.2 Caractéristiques des réseaux véhiculaires	7
1.3 Applications des systèmes de transport intelligents	9
1.3.1 Applications de sûreté routière	10
1.3.2 Applications de gestion du trafic	11
1.3.3 Applications d’infodivertissement et de confort	11
1.3.4 Applications de conduite autonome	12
1.4 Types de communication dans les réseaux véhiculaires	12
1.5 Allocation des fréquences pour les technologies DSRC	14
1.6 Architectures protocolaires	15
1.6.1 L’architecture IEEE WAVE	15
1.6.2 L’architecture ETSI ITS-S	16
1.7 Conclusion	18
2 Diffusion basée sur le délai des messages d’urgence	19
2.1 Introduction	19
2.2 Contexte de la diffusion multi-sauts dans l’environnement véhiculaire	19

2.3	Classifications des protocoles de diffusion	20
2.4	Protocoles de diffusion basés sur le délai	21
2.4.1	Protocoles basés sur le récepteur	21
2.4.2	Protocoles basés sur l'émetteur	24
2.4.3	Protocoles hybrides	25
2.5	Conclusion	26
 II Contributions		28
 3 Mécanisme plus efficace de suppression de diffusions		29
3.1	Introduction	29
3.2	Motivation	29
3.3	Analyse de la suppression imprécise des transmissions redondantes	31
3.4	uHBS : Mécanisme non hâtif de suppression de diffusions	33
3.5	uHBS-DP : Protocole de diffusion basé sur le mécanisme uHBS	34
3.5.1	Principes de conception	35
3.5.2	Schéma hybride de sélection des relayeurs	35
3.6	Évaluation des performances	37
3.6.1	Configuration de simulation	37
3.6.2	Mesures de performance	39
3.6.3	Résultats de simulation	40
3.7	Conclusion	46
 4 Schéma évolutif de diffusion basé sur la répartition temporelle		47
4.1	Introduction	47
4.2	Motivation	47
4.3	TDB : Schéma de diffusion basé sur la répartition temporelle	49
4.4	UV-TDB : Protocole de diffusion basé sur le schéma TDB	54
4.4.1	Principes de conception	54
4.4.2	Schéma hybride de sélection des relayeurs	56
4.4.2.1	Désignation des candidats à la retransmission les plus appropriés	57
4.4.2.2	Attribution de temps d'attente aux FCs	57
4.5	Évaluation des performances	60
4.5.1	Configuration de simulation	60
4.5.2	Mesures de performance	61
4.5.3	Résultats de simulation	63
4.6	Conclusion	69

TABLE DES MATIÈRES

Conclusion et perspectives 72

Bibliographie 74

Table des figures

1.1	Applications des systèmes de transport intelligents.	9
1.2	Types de communication [20].	13
1.3	Attribution des canaux de la FCC [21].	14
1.4	Attribution des canaux de l'Union Européenne [11].	15
1.5	Le modèle de référence WAVE [21].	16
1.6	L'architecture de référence ITS-S [24].	17
1.7	Relation entre les architectures protocolaires [21].	18
3.1	Mécanismes de suppression de diffusions. (a) Mécanismes de suppression de diffusions basés sur la réception en double du même message. (b) Mécanismes de suppression de diffusions basés sur l'état du canal.	30
3.2	Illustration des cas de la différence entre les temps d'attente de deux FCs voisins.	32
3.3	Illustration du mécanisme proposé pour la suppression de diffusions. (a) Organigramme. (b) Algorithme.	34
3.4	Illustration de la carte routière de Manhattan utilisée dans l'évaluation.	38
3.5	Comparaison du taux de collision obtenu par uHBS-DP et ses deux variantes : EMRBS-var et CSBS-var.	41
3.6	Comparaison du taux de livraison obtenu par uHBS-DP et ses deux variantes : EMRBS-var et CSBS-var.	42
3.7	Comparaison de la surcharge de diffusion obtenue par uHBS-DP et ses deux variantes : EMRBS-var et CSBS-var.	42
3.8	Taux de collision : AddP vs. uHBS-DP.	43
3.9	Taux de livraison : AddP vs. uHBS-DP.	44
3.10	Surcharge de diffusion : AddP vs. uHBS-DP.	44
3.11	Délai de dissémination : AddP vs. uHBS-DP.	45
4.1	Illustration de la définition des zones dans le schéma TDB.	49
4.2	Illustration des classes de zones. (a) Classe numéro 1. (b) Classe numéro 2. (c) Classe numéro 3.	50
4.3	Diagramme de temps du schéma TDB (illustration d'un exemple).	53
4.4	Illustration des principales étapes du processus de diffusion du protocole UV-TDB.	55

TABLE DES FIGURES

4.5	Algorithme de désignation des candidats à la retransmission les plus appropriés.	58
4.6	Exemples d'attribution de délais supplémentaires.	60
4.7	Illustration des cartes routières utilisées dans l'évaluation. (a) Carte routière de Manhattan. (b) Carte routière d'Alger.	61
4.8	Taux de collision. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d'Alger.	65
4.9	Taux d'interférence. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d'Alger.	65
4.10	Taux de réception des transmissions. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d'Alger.	66
4.11	Taux de livraison. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d'Alger.	67
4.12	Surcharge de diffusion. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d'Alger.	68
4.13	Délai de dissémination. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d'Alger.	69

Liste des tableaux

2.1	Principales caractéristiques des protocoles connexes	26
3.1	Sommaire des notations	31
3.2	Paramètres de simulation	39
4.1	Sommaire des notations	48
4.2	Paramètres de simulation	62
4.3	Densité locale de véhicules	64
4.4	Performance de notre protocole UV-TDB par rapport aux protocoles AddP et HyDiAck à la plus forte densité de véhicules évaluée.	70

Liste des abréviations

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
BM	<i>Beacon Message</i>
CAV	<i>Connected and Autonomous Vehicle, aussi appelé Connected and Automated Vehicle</i>
CBR	<i>Channel Busy Ratio</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCH	<i>Control Channel</i>
CH	<i>Cluster Head</i>
CM	<i>Cluster Member</i>
C-V2X	<i>Cellular Vehicle-to-Everything</i>
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communications</i>
EM	<i>Emergency Message</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FC	<i>Forwarding Candidate</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
I2I	<i>Infrastructure to Infrastructure</i>
ICT	<i>Information and Communication Technologies</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
ITS-S	<i>Intelligent Transport System-Station</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging, aussi appelé Laser imaging Detection And Ranging</i>
LLC	<i>Logical Link Control sublayer</i>
MAC	<i>Medium Access Control sublayer</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc NETWORKs</i>
MPD	<i>MAC Processing Delay</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PHY	<i>PHYSical layer</i>
RoI	<i>Region of Interest</i>
RSU	<i>Road Side Unit</i>

LISTE DES ABRÉVIATIONS

RTB/CTB	<i>Request-To-Broadcast / Clear-To-Broadcast</i>
Rx/Tx	<i>Receive/Transmit</i>
SCF	<i>Store-Carry-Forward</i>
SCH	<i>Service Channel</i>
SUMO	<i>Simulation of Urban Mobility</i>
TDB	<i>Time-Division-based Broadcast scheme</i>
TraCI	<i>Traffic Control Interface</i>
uHBS	<i>unHurried Broadcast Suppression</i>
uHBS-DP	<i>uHBS based Dissemination Protocol</i>
UV-TDB	<i>Urban, Vehicular and Time-Division-based Broadcast protocol</i>
V2B	<i>Vehicle to Barrier</i>
V2C	<i>Vehicle to Cloud</i>
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i>
V2P	<i>Vehicle to Pedestrian</i>
V2U	<i>Vehicle to Unmanned-Aerial-Vehicle</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle to everything</i>
VANET	<i>Vehicular Ad-Hoc NETwork</i>
Veins	<i>Vehicles in Network Simulation</i>
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environments</i>
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i>

Introduction générale

LES besoins croissants de développement du secteur des transports pour faire face efficacement aux défis liés à la congestion du trafic, tels que l'augmentation des émissions, des décès sur les routes et de l'impact économique, ont conduit à une course sans précédent pour développer des infrastructures routières avancées et des moyens de transport révolutionnaires tels que les véhicules connectés et autonomes (CAVs : *Connected and Autonomous Vehicles*) [40, 13]. Grâce à leurs caractéristiques de connectivité et d'autonomie, les CAVs permettront des communications fiables et efficaces de véhicule à véhicule (V2V : *Vehicle to Vehicle*), de véhicule à infrastructure (V2I : *Vehicle to Infrastructure*) et de véhicule à tout (V2X : *Vehicle to everything*) [14]. Ainsi, la technologie des CAVs devrait jouer un rôle clé dans le développement des systèmes de transport intelligents (ITS : *Intelligent Transportation Systems*) pour les futures villes intelligentes [12]. L'amélioration de la sécurité lors de diverses manœuvres de véhicules, le contrôle et la réduction de la congestion du trafic par une gestion plus efficace de l'infrastructure routière, et la fourniture de nombreux services de confort aux utilisateurs sont des applications typiques des ITS [11].

Bon nombre de ces applications, notamment celles liées à la sûreté routière, s'appuient sur des protocoles de diffusion pour disséminer des informations sur le réseau. Ces protocoles de diffusion peuvent généralement être divisés en deux catégories principales : la diffusion multi-sauts et la diffusion à saut unique [37]. Dans la diffusion multi-sauts, certains véhicules proches du véhicule émetteur retransmettent le paquet et deviennent ainsi des relayers. De même, un sous-ensemble de véhicules récepteurs transmet le paquet jusqu'à ce qu'il atteigne autant de véhicules que possible dans la zone de diffusion (c'est-à-dire la région d'intérêt (RoI : *Region of Interest*) ou la zone cible) [30]. Cette approche est adaptée à la diffusion de messages d'urgence (EMs : *Emergency Messages*), tels que les alertes post-accident, l'approche d'un véhicule d'urgence, etc., dans lesquels le véhicule d'origine de l'EM est situé à l'intérieur de la RoI qui dépasse généralement la portée de transmission du véhicule (R) [7]. D'autre part, dans la diffusion à un seul saut, chaque véhicule diffuse périodiquement des messages contenant des informations à partager avec les véhicules voisins directs (par exemple, la densité locale de véhicules, la position, la vitesse, etc.), et ces messages ne sont jamais retransmis. Ces messages, souvent ap-

pelés messages de balise (BMs : *Beacons Messages*), sont également connus sous le nom de messages de sûreté de base (BSMs : *Basic Safety Messages*) ou de messages de sensibilisation coopérative (CAMs : *Cooperative Awareness Messages*) [49].

Dans les réseaux véhiculaires, c'est-à-dire les réseaux de CAVs, ces BMs permettent à chaque véhicule de mieux connaître son environnement afin de faciliter les tâches de coordination et de communication. En outre, des protocoles de routage sont utilisés pour établir des voies de communication de bout en bout entre les véhicules. En raison des densités variables de véhicules dans les réseaux véhiculaires, les protocoles de diffusion utilisés dans les deux catégories ci-dessus souffrent d'un haut niveau de collisions de paquets lorsque la densité de véhicules est élevée [37], car un grand nombre de véhicules dans le même voisinage peuvent transmettre des paquets simultanément, ce qui entraîne ce que l'on appelle communément une tempête de diffusion [30, 4]. Par conséquent, le principal défi pour tout protocole de diffusion est de contrôler efficacement la congestion du réseau pour assurer une meilleure évolutivité.

Pour relever ce défi, les protocoles de diffusion à un seul saut développés ces dernières années sont principalement basés sur l'adaptation de la périodicité des BMs (c'est-à-dire le contrôle de leur fréquence de transmission) [41], l'ajustement de leur puissance de transmission pour réduire le nombre de récepteurs potentiels [27], ou la combinaison de ces deux stratégies d'adaptation avec d'autres [50, 3]. En outre, des algorithmes de prédiction ont également été utilisés pour concevoir des solutions proactives de contrôle de la congestion qui visent à prédire à l'avance de l'état de congestion et à prendre les mesures appropriées pour l'éviter [49]. En ce qui concerne les protocoles de diffusion multi-sauts, l'idée commune utilisée pour contrôler la congestion du réseau est de réduire le nombre de retransmissions en sélectionnant un nombre limité de véhicules comme relayeurs, tout en maintenant la fiabilité des protocoles.

Contributions

Dans ce contexte, ce travail se concentre sur la diffusion multi-sauts des EMs en milieu urbain pour des applications liées à la sûreté routière. Ce type d'applications nécessite une diffusion rapide et fiable. Pour surmonter le problème de congestion susmentionné, les protocoles de diffusion des EMs utilisent des mécanismes de suppression de diffusions pour réduire la charge supplémentaire due aux retransmissions de messages d'urgence. Ceci est réalisé en supprimant les retransmissions redondantes tout en maintenant un niveau de fiabilité élevé [10]. Dans ce

but, les mécanismes de suppression gèrent la contention pour relayer l'EM entre les véhicules candidats (FCs : *Forwarding Candidates*). À la réception de l'EM, chaque FC se voit attribuer une valeur de priorité pour devenir un relayer, exprimée soit par une probabilité, soit par un délai d'attente avant retransmission [37]. Dans les mécanismes de suppression basés sur les probabilités [51, 33, 54], chaque FC retransmet l'EM reçu en fonction de la probabilité de retransmission qui lui est attribuée. Comme les probabilités attribuées aux FCs sont différentes, tous ces FCs ne retransmettront pas l'EM. Cela réduit le nombre de retransmissions et donc la congestion du réseau. Cependant, les mécanismes de suppression basés sur le délai [36, 8, 47] gèrent la contention entre les FCs en leur attribuant différents temps d'attente avant retransmission. Fondamentalement, le FC ayant le délai d'attente le plus court a la plus haute priorité pour devenir un relayer de l'EM. Pour éviter les retransmissions redondantes, chaque FC interrompt son processus d'attente et annule la retransmission de l'EM dès qu'il considère que ce message a déjà été retransmis.

Nous pouvons distinguer deux cas considérés par les mécanismes existants de suppression de diffusions, basés sur le délai, qui permettent à un FC de détecter la retransmission de l'EM par un relayer :

1. Après la réception en double du même message [10, 36, 48, 5, 2, 39] ;
2. Après l'expiration du délai d'attente, si le canal est trouvé occupé alors une retransmission de l'EM est supposée [47, 52].

Dans la première contribution, nous analysons d'abord les inconvénients de la prise en compte de l'un de ces cas dans les mécanismes de suppression de diffusions basés sur le délai. Ensuite, nous proposons un nouveau mécanisme de suppression de diffusions (*uHBS : unHurried Broadcast Suppression*) qui évite les décisions imprécises de supprimer ou de relayer l'EM. Dans le mécanisme que nous proposons, les décisions de suppression ou de retransmission tiennent compte de l'occurrence d'une réception en double de l'EM et d'une indication, reçue de la couche inférieure, sur l'état d'occupation du canal. Cela permet d'améliorer la suppression des retransmissions pour mieux contrôler la congestion du réseau sans affecter la fiabilité du protocole de diffusion. Ensuite, nous utilisons le mécanisme de suppression de diffusions proposé comme base pour concevoir un nouveau protocole basé sur le délai (*uHBS-DP : uHBS based Dissemination Protocol*) pour la diffusion des EMs dans les réseaux urbains de véhicules. L'évaluation des performances basée sur la simulation a montré que le nouveau mécanisme de suppression de diffusions permet à uHBS-DP d'atteindre une fiabilité élevée avec une faible surcharge de diffusion par rapport à ses variantes CSBS-var et EMRBS-var (CSBS-var utilise un mécanisme de suppression basé sur l'état du canal, tandis que dans EMRBS-var la décision

de suppression est prise uniquement sur la base de la détection de la réception en double du même EM). Les résultats de la simulation montrent également que notre protocole uHBS-DP est plus efficace, en termes de taux de collision, de surcharge de diffusion et de délai de dissémination, que le protocole bien connu AddP [36].

Dans cette thèse, nous nous intéressons également à l'atténuation des interférences provenant des nœuds cachés (c'est-à-dire des véhicules). Bien que de nombreux protocoles de diffusion multi-sauts aient été proposés ces dernières années, tels que [10, 2, 39, 5, 54], leur problème commun reste leur dépendance à la sélection des relayeurs uniquement pour atténuer l'impact des interférences des nœuds cachés, sans chercher des stratégies supplémentaires pour soutenir cette sélection ou la compléter pour obtenir de meilleurs résultats. Par conséquent, notre objectif est de concevoir une nouvelle stratégie pour gérer plus efficacement ces interférences et minimiser les collisions. Dans ce but, notre seconde contribution est la proposition d'un nouveau protocole de diffusion appelé UV-TDB (*an Urban, Vehicular and Time-Division-based Broadcast protocol*). En plus d'utiliser une méthode de sélection hybride basée sur une décision partagée entre l'émetteur et le récepteur, UV-TDB emploie une technique de répartition temporelle pour les retransmissions (TDB : *Time-Division based Broadcast scheme*). Le schéma TDB que nous proposons consiste à organiser les retransmissions des relayeurs en attribuant des créneaux temporels différents aux zones dans lesquelles ils se trouvent. Cela permet à UV-TDB d'atténuer la contention des canaux et les interférences des nœuds cachés lorsque la densité des véhicules augmente. UV-TDB utilise également le mécanisme SCF (*Store-Carry-Forward*) [46] pour tenir compte du problème des déconnexions fréquentes dues à la grande mobilité des véhicules ou lorsque la densité des véhicules est faible, et maintient ainsi une diffusion fiable. Par conséquent, comme le montrent les résultats de l'évaluation des performances, notre protocole réduit la surcharge de diffusion tout en maintenant un taux de livraison élevé grâce à l'efficacité de sa méthode de sélection des relayeurs. En outre, UV-TDB s'adapte à différents niveaux de densité de véhicules et garantit ainsi des performances évolutives.

Organisation du manuscrit

Cette thèse est organisée en deux parties. La première partie, intitulée État de l'art, est composée du chapitre 1 et du chapitre 2, et la seconde partie, intitulée Contributions, est également composée de deux chapitres, le chapitre 3 et le chapitre 4.

Le chapitre 1 introduit les notions de base relatives aux réseaux véhiculaires. Tout

d'abord, nous présentons leurs principales caractéristiques, leurs applications et les types de communication utilisés. Ensuite, nous décrivons les différentes architectures protocolaires proposées pour ce type de réseau, notamment aux Etats-Unis et en Europe.

Dans le chapitre 2, nous examinons brièvement une sélection de protocoles de diffusion des messages d'urgence, basés sur le délai, qui sont directement liés aux contributions de cette thèse. Les caractéristiques qui distinguent ces protocoles sont résumées dans un tableau comparatif.

Le chapitre 3 contient notre contribution à l'amélioration de la précision de la suppression des retransmissions redondantes dans les protocoles de diffusion basés sur le délai. Le chapitre présente un nouveau mécanisme de suppression plus efficace ainsi qu'un nouveau protocole de diffusion de messages d'urgence dans les réseaux urbains de véhicules basé sur le mécanisme de suppression proposé.

Dans le chapitre 4, nous présentons notre contribution à l'atténuation des interférences provenant de nœuds cachés lors de la diffusion des messages d'urgence. Tout d'abord, nous présentons un nouveau schéma de diffusion basé sur la répartition temporelle afin de répondre à ce problème. Ensuite, le schéma de diffusion proposé est utilisé comme base pour la conception d'un nouveau protocole efficace et évolutif pour la diffusion de messages d'urgence dans les réseaux urbains de véhicules.

Nous concluons cette thèse en rappelant ses contributions et résultats, ainsi que quelques perspectives soulevées par nos travaux.

PREMIÈRE PARTIE

État de l'art

Vue d'ensemble des réseaux véhiculaires

1.1 Introduction

Dans le monde d'aujourd'hui, les technologies de communication avancées sont utilisées pour développer la gestion intelligente des transports et l'assistance ou l'automatisation de la conduite. Grâce à la possibilité d'échanger des informations sur le trafic et l'infodivertissement entre l'infrastructure routière et les véhicules, les réseaux véhiculaires promettent d'améliorer l'efficacité des transports, la prévention des accidents et le confort des usagers. Dans ce chapitre, nous présentons les concepts liés aux réseaux véhiculaires en nous concentrant sur leurs défis en matière de communication et d'application.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La section suivante présente les caractéristiques et les défis des réseaux de véhicules. Dans la section 1.3, nous présentons les principales catégories d'applications des systèmes de transport intelligents. Ensuite, les sections 1.4, 1.5 et 1.6 fournissent une description des types et technologies de communication, ainsi que des architectures de protocole pour ce type de réseaux. Enfin, nous concluons ce chapitre dans la section 1.7.

1.2 Caractéristiques des réseaux véhiculaires

Le paradigme émergent du système de véhicules connectés et autonomes promet de révolutionner le développement du transport intelligent pour les futures villes intelligentes. Ces réseaux véhiculaires ont leurs propres caractéristiques par rapport à d'autres types de réseaux mobiles ad hoc (MANET : *Mobile Ad hoc NETWORKS*). Les caractéristiques spécifiques des réseaux véhiculaires incluent :

1. **Déplacement prévisible :**

Les réseaux véhiculaires diffèrent des autres types de réseaux mobiles ad hoc dans lesquels les nœuds se déplacent de manière aléatoire, car les véhicules

sont contraints par la topologie et la configuration du réseau routier et par l'obligation de respecter les panneaux de signalisation et les feux de circulation et de répondre aux autres véhicules en mouvement, ce qui rend leur déplacement prévisible.

2. Variation de la mobilité :

Les véhicules connectés et autonomes peuvent se déplacer lentement (par exemple, dans les embouteillages et les intersections routières), ou se déplacer à grande vitesse, comme sur les autoroutes et les routes peu fréquentées. Cette variation de la mobilité des véhicules a entraîné divers défis pour la communication véhiculaire.

3. Changements rapides de la topologie du réseau :

Les vitesses élevées caractérisent les véhicules en mouvement, en particulier sur les autoroutes, ce qui entraîne des changements rapides de la topologie du réseau. De plus, le comportement des conducteurs est affecté par la nécessité de réagir aux données reçues du réseau, ce qui entraîne des changements dans la topologie du réseau.

4. Densité de véhicules variable :

La densité de véhicules du réseau varie en fonction de la densité du trafic, qui peut être très élevée dans le cas des embouteillages, aux intersections et sur les routes proches des lieux de travail et des marchés, ou très faible comme dans le trafic suburbain. De même, la densité est généralement plus élevée en journée qu'en soirée.

5. Déconnexion fréquente du réseau :

La densité et la mobilité des véhicules ont un impact élevé sur la déconnexion du réseau véhiculaire. Le réseau subit plusieurs déconnexions lorsque la densité des véhicules diminue, ce qui affecte négativement la continuité des communications et le transfert des paquets.

6. Durée de vie très courte des liaisons entre véhicules :

La durée de vie des liaisons entre véhicules est affectée par la portée de communication, la vitesse et la direction des véhicules. Ainsi, l'augmentation de la portée de communication entraîne une augmentation de la durée de vie des liaisons. En outre, la durée de vie d'une liaison entre des véhicules se déplaçant à grande vitesse dans des directions opposées est très courte par rapport au cas où les véhicules se déplacent dans la même direction.

7. Réseau à grande échelle :

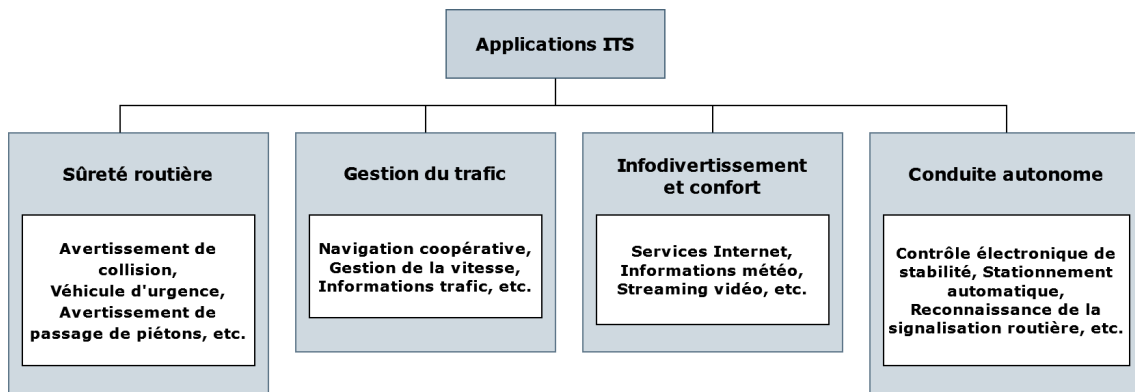


FIGURE 1.1 – Applications des systèmes de transport intelligents.

L'échelle du réseau véhiculaire pourrait être grande dans les zones urbaines denses telles que les centres-villes, les autoroutes et à l'entrée des grandes villes.

8. Aucune contrainte énergétique :

La consommation d'énergie dans les réseaux véhiculaires n'est pas un défi critique comme dans des réseaux MANET, car les véhicules ont la capacité de fournir une alimentation continue via leurs batteries longue durée.

9. Capacité de calcul élevée :

Les véhicules connectés et autonomes peuvent être équipés d'un nombre suffisant de capteurs et de ressources de calcul, tels que des processeurs, une grande capacité de mémoire, une technologie d'antenne avancée, un système de positionnement global (GPS : *Global Positioning System*), etc. Ces ressources augmentent la capacité de calcul des véhicules.

1.3 Applications des systèmes de transport intelligents

Les applications ITS exploitent les données de circulation en temps réel pour gérer efficacement le flux de circulation, améliorer la sécurité et le confort des usagers et soutenir la mobilité durable. Comme le montre la figure 1.1, les applications ITS peuvent être classées selon leur objectif principal en quatre grandes catégories : (i) sûreté routière ; (ii) gestion du trafic ; (iii) infodivertissement et confort ; et (iv) applications de conduite autonome [19].

1.3.1 Applications de sûreté routière

Les applications de sûreté routière exploitent les communications entre les entités ITS afin de diminuer les accidents de la circulation et de protéger les conducteurs et les piétons des divers dangers de la route. À cette fin, chaque véhicule diffuse périodiquement des BMs pour informer son voisinage de son contexte et de son emplacement. En outre, en fonction d'événements spécifiques (par exemple, des accidents, des dangers routiers détectés), chaque entité ITS peut également déclencher la transmission de messages de notification aux véhicules et/ou aux services d'urgence situés à proximité en utilisant des communications à sauts multiples. Dans ce scénario, la fiabilité et le délai de communication de bout en bout représentent les exigences les plus importantes des applications de sûreté routière.

Plusieurs exemples typiques d'applications émergentes de la sûreté routière peuvent être cités. Un premier exemple consiste en une application d'avertissement de passage de piétons dans laquelle les conducteurs sont avertis lorsque des piétons traversent la route. À cette fin, des capteurs sont déployés le long des trottoirs pour détecter la présence de personnes, et les événements sensoriels correspondants sont collectés au niveau des unités de bord de route (RSU : *Road Side Unit*). Ces RSUs peuvent ainsi détecter et/ou prédire l'occurrence d'accidents potentiels et avertir les véhicules qui arrivent.

Un deuxième exemple consiste en une application d'aide à la conduite en cas de virage à gauche à une intersection. Dans ce scénario, deux véhicules peuvent s'approcher d'une intersection sans se voir l'un l'autre en raison d'obstructions visuelles (par exemple, des arbres, un bâtiment, etc.). L'objectif d'une telle application est donc d'aider le conducteur à effectuer un virage à gauche plus sûr à l'intersection. À cette fin, les RSUs collectent des informations provenant des véhicules et/ou des capteurs routiers déployés pour détecter l'apparition d'un tel événement et, ainsi, fournir des recommandations et des notifications opportunes aux conducteurs concernés.

Enfin, un troisième exemple est lié à l'application d'avertissement d'un véhicule d'urgence en approche. Dans cet exemple, un véhicule d'urgence en approche (par exemple, de police, une ambulance, etc.) demande aux véhicules à proximité de former un couloir et de dégager la voie. En outre, le véhicule d'urgence pourrait communiquer avec l'infrastructure routière proche pour que les feux de circulation passent au vert, ce qui réduirait le temps de réponse de l'urgence. Parmi les autres exemples d'applications de sûreté routière, on peut citer : l'avertissement de freinage d'urgence, l'indication de véhicules à l'arrêt, l'avertissement de travaux routiers, l'évitement des collisions aux intersections, l'avertissement de changement de voie, et bien d'autres.

1.3.2 Applications de gestion du trafic

Les applications de gestion du trafic constituent une grande catégorie d'applications ITS, dont l'objectif principal est d'améliorer la gestion et la coordination des flux de trafic et de fournir divers services de navigation coopératifs aux conducteurs. Ces applications s'appuient sur la collecte et l'analyse des messages ITS échangés (c'est-à-dire entre des entités STI telles que des véhicules, des unités de bord de route, des infrastructures routières, etc.) afin de créer et de maintenir des bases de données cartographiques globales sur le trafic. Les données sur le trafic sont généralement collectées par les unités et capteurs routiers déployés et sont transmises à des centres de données fiables distants pour une analyse et un traitement ultérieurs des données. Les données collectées comprennent des informations contextuelles et de localisation liées aux véhicules et aux événements routiers.

Une fois les données collectées traitées et traduites en informations significatives, celles-ci sont transmises aux conducteurs par l'intermédiaire de fournisseurs de services pour les informer des zones encombrées actuelles et/ou futures, des itinéraires recommandés, des instructions de navigation, des notifications de limitation de vitesse, etc. En outre, ces applications de gestion du trafic peuvent permettre aux autorités d'effectuer une analyse avancée des données relatives au trafic afin de mieux optimiser l'utilisation et/ou la planification des futures infrastructures routières.

1.3.3 Applications d'infodivertissement et de confort

Les applications d'infodivertissement et de confort visent à améliorer l'expérience de déplacement en fournissant aux conducteurs et passagers divers services à valeur ajoutée. Ces services sont généralement proposés par des fournisseurs de confiance pour rendre le voyage plus agréable. Les unités d'application des véhicules communiquent avec les centres de données des fournisseurs de services à distance en utilisant différentes technologies de communication (par exemple, 4G/LTE, 5G). Un exemple typique d'une telle application est l'application de diagnostic et d'entretien à distance des véhicules, dans laquelle les fournisseurs de services collectent des informations à partir des capteurs embarqués et envoient des notifications aux conducteurs concernant les défauts de sécurité détectés et/ou pour leur rappeler l'entretien planifié de la voiture.

Une autre application consiste à fournir des informations sur la météo et le trafic et indiquer l'emplacement du restaurant, de la station-service ou de l'hôtel le plus proche ainsi que leurs prix. Les passagers peuvent jouer à des jeux en ligne, accéder à l'internet et envoyer ou recevoir des messages instantanés pendant que le véhicule

est connecté au réseau d'infrastructure.

1.3.4 Applications de conduite autonome

Les applications de conduite autonome, également connues sous le nom de conduite automatisée, représentent le prochain grand progrès des technologies de transport et devraient être déployées à pleine capacité dans un avenir proche. Cette nouvelle technologie repose sur l'automatisation des fonctions de détection et de conduite du véhicule. Plusieurs niveaux d'autonomie sont prévus pour la conduite autonome, allant de l'absence totale d'autonomie, où le conducteur conduit sans assistance, à l'autonomie complète, autrement dit, la conduite entièrement autonome.

Pour des raisons de sécurité, les véhicules autonomes intègrent différentes technologies, notamment : des capteurs à ultrasons pour détecter la présence d'obstacles ; un système LiDAR (*Light Detection And Ranging* ou *Laser imaging Detection and Ranging*) et/ou un radar pour prévenir les accidents ; des caméras haute définition pour identifier en temps réel les dangers de la route, tels que les piétons et les animaux ; des récepteurs du système de navigation par satellite pour fournir une localisation très précise de la voiture ; et des technologies de communication pour permettre à la voiture de communiquer avec les véhicules à proximité, l'infrastructure routière, les fournisseurs de services à distance et les tiers de confiance.

1.4 Types de communication dans les réseaux véhiculaires

Dans les réseaux véhiculaires, les modules de communication sans fil fournissent différents types de liens de communication qui peuvent être classés en fonction des entités communicantes (voir la figure 1.2) [20] :

1. Communications de véhicule à véhicule (V2V) :

Les communications de véhicule à véhicule se passent directement entre les véhicules sans aucune infrastructure. Ces liaisons sont principalement utilisées pour partager des informations relatives à la sûreté routière.

2. Communications de véhicule à infrastructure (V2I) :

Les communications de véhicule à infrastructure permettent aux véhicules de partager des informations avec les infrastructures routières telles que les unités de bord de route (RSUs) ou les stations de base cellulaires. Ces liaisons peuvent également être utilisées pour partager des annonces et fournir un accès à Internet.

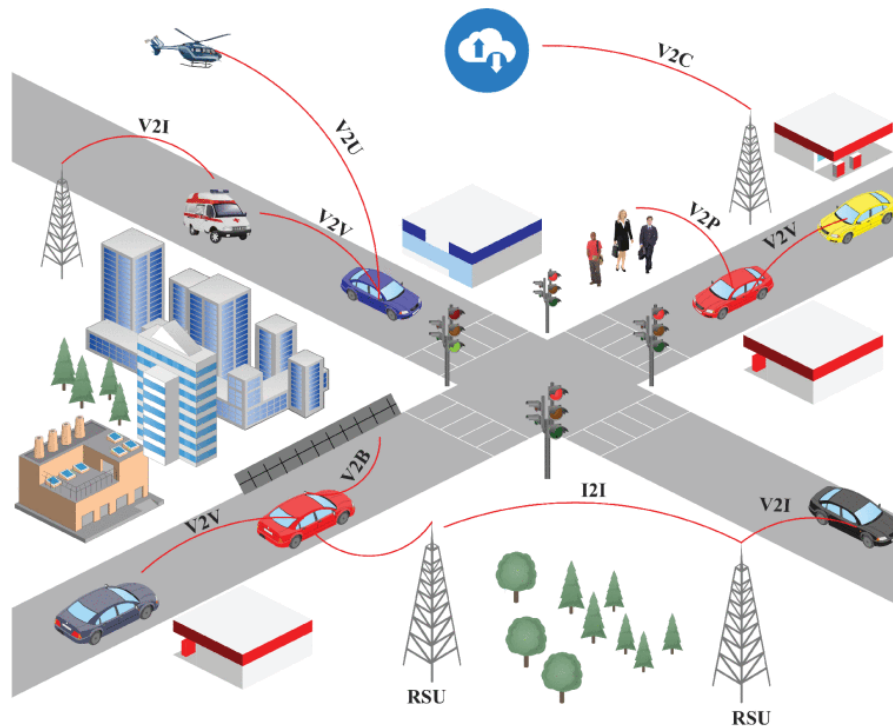


FIGURE 1.2 – Types de communication [20].

3. **Communications entre infrastructures (I2I) :**

Les communications entre infrastructures sont utilisées pour partager des informations sur le trafic routier global entre des infrastructures situées dans des zones spécifiques.

4. **Communications de véhicule à piéton (V2P) :**

Les communications véhicule à piéton sont utilisées pour partager des données avec des dispositifs portables autour des véhicules.

5. **Communications de véhicule à barrière (V2B) :**

Les communications de véhicule à barrière sont nécessaires pour partager des données avec les barrières en bordure de route. Cette communication bénéficie d'un nombre massif de capteurs pour éviter les accidents de sortie de route.

6. **Communications de véhicule à Cloud (V2C) :**

Les communications de véhicule à Cloud permettent aux RSU et aux serveurs de Cloud de communiquer pour plusieurs tâches, telles que l'analyse des données, la prise de décision et la prévision des transports.

7. **Communications de véhicule à drone (V2U) :**

Dans ce type de communications, les données sont transférées sans fil entre les véhicules et les drones par des liaisons entre le sol et l'air.

Tous ces mécanismes de communication, voire plus, sont connus collectivement sous le nom de V2X. Afin de rendre possible le paradigme de la communication V2X, les réseaux véhiculaires sont principalement basés sur deux familles de technologies de communications : (i) les normes DSRC (*Dedicated Short Range Communications*), principalement développées par l'ETSI et l'IEEE pour les communications V2V et V2I; et (ii) les normes cellulaires souvent appelées C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*), principalement développées par le 3GPP pour une large couverture.

1.5 Allocation des fréquences pour les technologies DSRC

Afin de promouvoir le développement des technologies de communication véhiculaire, les organisations de gestion du spectre attribuent des bandes exclusives pour les technologies DSRC. La figure 1.3 montre les canaux radio définis par la FCC (*Federal Communications Commission*) pour être utilisés par les communications DSRC aux États-Unis.

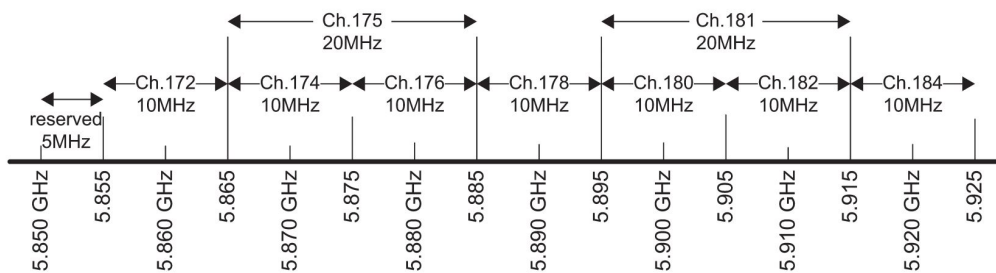


FIGURE 1.3 – Attribution des canaux de la FCC [21].

Le spectre est attribué comme suit [21] :

- Les fréquences de 5,850 GHz à 5,855 GHz sont maintenues en réserve.
- Le canal 178 est le canal de contrôle (CCH : *Control Channel*).
- Les canaux 172, 174, 176, 180, 182 et 184 sont des canaux de service (SCHs : *Service Channels*).
- Les canaux 174 et 176 et les canaux 180 et 182 pourraient être combinés pour produire deux canaux de 20 MHz, les canaux 175 et 181, respectivement.
- Les canaux 172 et 184 sont désignés pour des applications de sûreté publique impliquant la protection des vies et des biens.

Au sein de l'Union Européenne, l'attribution des canaux est conforme aux spécifications de la figure 1.4. La bande de fréquences est divisée en six canaux de service



FIGURE 1.4 – Attribution des canaux de l'Union Européenne [11].

(SCHs) et un canal de contrôle (CCH) avec une largeur de bande égale à 10 MHz chacun [24]. L'utilisation de CCH, SCH1 et SCH2 est dédiée à la sûreté routière des ITS, SCH3 et SCH4 sont essentiellement dédiés aux applications ITS non liées à la sûreté routière, et les canaux SCH5 et SCH6 sont réservés à l'usage futur des applications ITS pour le trafic routier.

Les technologies DSRC déployées dans d'autres régions du monde peuvent utiliser d'autres plans de canaux.

1.6 Architectures protocolaires

De nombreuses organisations sont impliquées dans l'effort de normalisation des technologies véhiculaires et de leurs architectures de réseau. Les architectures de communication sont généralement basées sur le modèle de référence en couches OSI de l'ISO. Cette section présente les deux architectures protocolaires IEEE WAVE et ETSI ITS-S, proposées aux Etats-Unis et en Europe, respectivement.

1.6.1 L'architecture IEEE WAVE

Le système WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) est un système de radiocommunications conçu pour fournir ses services dans le secteur des transports. Ces services comprennent les communications V2V, V2I et éventuellement les communications entre d'autres dispositifs WAVE.

Afin de répondre aux exigences des applications ITS, la norme IEEE 802.11 a été amendée pour soutenir l'accès sans fil dans les environnements véhiculaires. La norme IEEE 802.11p [22] qui en résulte utilise la bande de fréquences allouée aux applications ITS pour permettre les communications entre véhicules et entre véhicules et RSUs. Cette norme ne définit que les spécifications des couches PHY et MAC. Par la suite, la famille de normes IEEE 1609 a défini des spécifications

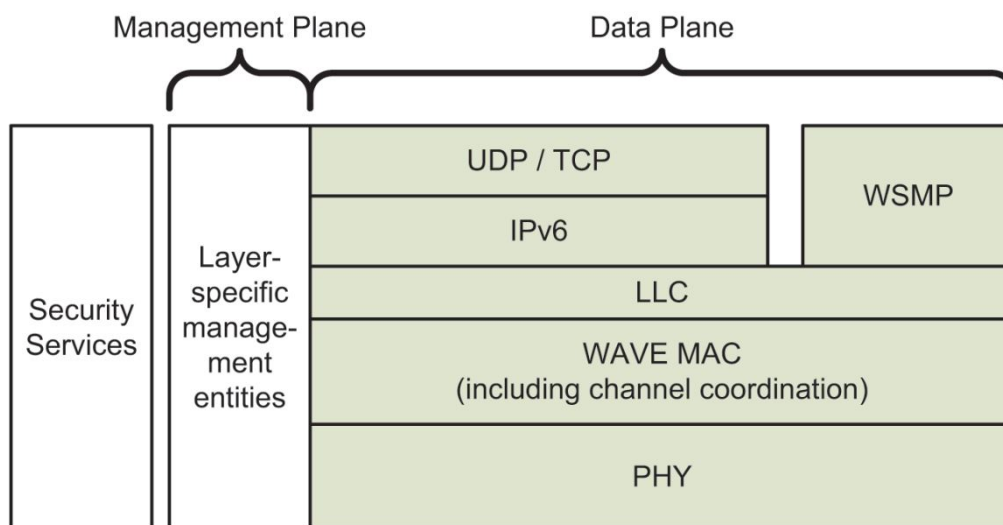


FIGURE 1.5 – Le modèle de référence WAVE [21].

supplémentaires pour les couches supérieures, au-dessus des couches PHY/MAC de la norme IEEE 802.11p, afin de compléter le système WAVE.

L'architecture et le fonctionnement du système WAVE sont décrits dans la norme IEEE 1609.0 [21]. La figure 1.5 montre la pile de protocoles de communication, optimisée pour l'environnement véhiculaire, fournie par WAVE. Cette pile de protocoles définit un volet de données pour les protocoles transportant des informations de couche supérieure, un volet de gestion pour les fonctions de gestion qui soutiennent indirectement le transfert d'informations, et des services de sécurité pour les applications et les messages de gestion. En outre, un ensemble commun de protocoles de couches PHY, MAC et LLC, ainsi que deux piles de protocoles au-dessus de LLC sont spécifiés. Les deux piles supérieures, spécifiées pour le trafic IPv6 (*Internet Protocol version 6*) et le trafic WSMP (*WAVE Short Message Protocol*), partagent une pile inférieure commune au niveau de la liaison de données et de la couche physique. Le protocole WSMP, conçu pour un fonctionnement optimisé dans un environnement véhiculaire sans fil, peut émettre sur n'importe quel canal. Le trafic IPv6 n'est autorisé que sur les SCHs, de manière à décharger le CCH du trafic IPv6 à grand volume. Un dispositif WAVE peut soutenir l'un des protocoles WSMP ou IPv6, ou les deux.

1.6.2 L'architecture ETSI ITS-S

L'architecture de référence ITS-S (*Intelligent Transport System-Station*), présentée à la figure 1.6, suit les principes du modèle en couches OSI pour les protocoles de communication, qui est étendu pour inclure les applications ITS.

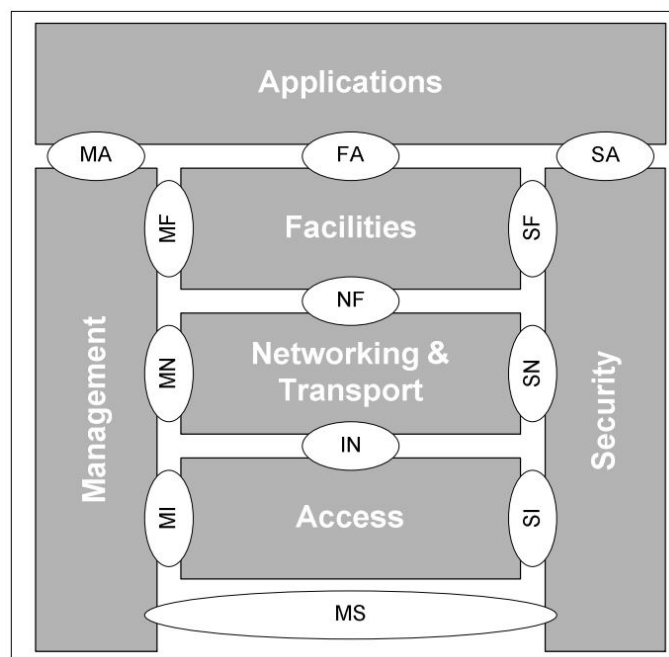


FIGURE 1.6 – L'architecture de référence ITS-S [24].

Les trois blocs inférieurs au milieu de la figure 1.6 contiennent la fonctionnalité de la pile de protocoles de communication OSI avec :

- *Access* représente les couches OSI 1 et 2 ;
- *Networking & Transport* représente les couches OSI 3 et 4 ;
- *Facilities* représente les couches OSI 5, 6 et 7.

Dans la figure 1.6, le bloc *Applications* présente les applications qui fournissent des services ITS aux utilisateurs, le côté gauche montre l'entité de gestion qui est chargée de gérer les communications dans la station ITS, et le côté droit montre l'entité qui fournit des services de sécurité à la pile de protocoles de communication OSI et à l'entité de gestion. L'entité de sécurité peut également être considérée comme une partie spécifique de l'entité de gestion.

Par exemple, dans l'architecture de référence ITS-S, la sûreté routière est une application située au-dessus de la couche *Application* du modèle de référence OSI ; IPv6 et les protocoles de messagerie se trouvent dans la couche *Networking & Transport* ; et IEEE 802.x, cellulaire 3G/4G/LTE et Bluetooth se trouvent dans la couche *Access*. L'architecture de référence ITS-S et sa relation avec le modèle de référence OSI et la pile de protocoles IEEE WAVE sont présentées à la figure 1.7.

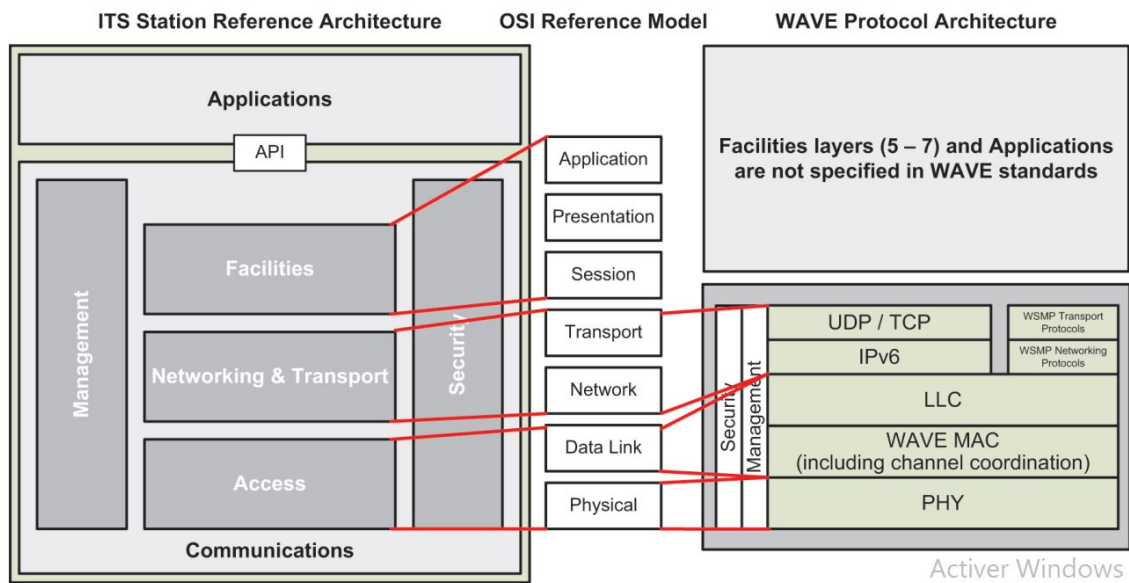


FIGURE 1.7 – Relation entre les architectures protocolaires [21].

1.7 Conclusion

Le réseau véhiculaire est une technologie clé pour les systèmes de transport intelligents. Le déploiement des ITS permettra aux véhicules de communiquer de manière autonome avec d'autres véhicules à proximité et avec l'infrastructure routière, ce qui ouvrira la voie à une variété de nouvelles applications de sûreté routière et d'aide à la conduite. Ce chapitre a donné un aperçu des communications véhiculaires en présentant leurs principales caractéristiques et, par conséquent, les défis supplémentaires auxquels sont confrontés les concepteurs de protocoles. Il a également exploré les catégories d'applications ITS, les différents types de communication et les principales architectures de protocole pour ce type de réseau.

Diffusion basée sur le délai des messages d'urgence

2.1 Introduction

En s'appuyant sur les réseaux véhiculaires, les systèmes de transport intelligents promettent de réduire les accidents de la circulation, et donc de protéger la vie des usagers de la route, en mettant en œuvre des applications de sûreté routière. Ces dernières exigent que leurs informations de sensibilisation et d'alerte soient propagées vers les véhicules concernés, avec un faible délai et une grande fiabilité. Pour ces raisons, cette catégorie d'applications est considérée comme sensible au délai et orientée vers la diffusion (c'est-à-dire qu'elle utilise des communications par diffusion). Dans cette étude, nous nous intéressons à la diffusion multi-sauts de messages d'urgence pour les applications de sûreté routière.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La section suivante décrit le contexte de la diffusion multi-sauts dans l'environnement véhiculaire. Dans la section 2.3, nous présentons des classifications de protocoles de diffusion en fonction de leurs principales caractéristiques de conception. Ensuite, nous examinons brièvement une sélection de protocoles basés sur le délai, qui sont directement liés à nos contributions, dans la section 2.4. Enfin, nous concluons ce chapitre dans la section 2.5.

2.2 Contexte de la diffusion multi-sauts dans l'environnement véhiculaire

La diffusion constitue la base de la communication dans les réseaux ad hoc, y compris les réseaux ad hoc véhiculaires. L'intérêt public des données relatives au trafic rend approprié le recours à la diffusion pour leur dissémination. L'inondation est le style de diffusion le plus simple, dans lequel le véhicule d'origine diffuse un message à tous ses voisins à un saut. Dans la diffusion multi-sauts, tous les voisins

récepteurs rediffusent le même message à leurs voisins à un saut, et ainsi de suite. Cette méthode simple de diffusion peut facilement conduire au problème de tempête de diffusion dans les réseaux à haute densité, lorsque de nombreux véhicules se trouvant dans le même voisinage diffusent presque simultanément, ce qui entraîne trop de collisions. Par conséquent, l'inondation n'est pas adaptée aux réseaux denses en raison de la rediffusion excessive des mêmes données [9].

L'approche de base couramment utilisée pour résoudre le problème des tempêtes de diffusion consiste à diminuer le nombre de messages redondants afin de réduire la congestion du réseau en sélectionnant seulement un sous-ensemble de véhicules recevant le message de diffusion comme relayeurs [31]. Puisque seule une partie des véhicules participe à la retransmission du message, la surcharge de diffusion ainsi que le nombre de collisions sont réduits.

D'autre part, lorsque la densité de véhicules est faible et en raison de leur vitesse élevée, les déconnexions fréquentes du réseau affectent le processus de diffusion des messages. Pour surmonter ce problème et maintenir un processus de diffusion fiable, le mécanisme SCF (*Store-Carry-Forward*) [46] est généralement adopté par les protocoles de diffusion existants. Dans ce mécanisme, le message est transporté par le véhicule jusqu'à ce qu'il rencontre un autre véhicule, qui n'est pas informé du message, avant de le transmettre.

2.3 Classifications des protocoles de diffusion

Plusieurs protocoles ont été proposés pour la diffusion multi-sauts des EMs. Ils diffèrent principalement par les caractéristiques de conception suivantes de leurs méthodes de sélection des prochains relayeurs [12, 11] :

- Le choix des FCs (déterministe ou opportuniste) ;
- Si la décision sur la priorité à devenir relayeur est prise par l'émetteur ou le récepteur ou si elle est partagée entre les deux (basée sur l'émetteur, basée sur le récepteur ou hybride) ;
- Les facteurs pris en compte pour calculer cette priorité ;
- Si la priorité est une probabilité de retransmission ou si elle est exprimée sous la forme d'un délai avant la retransmission (basée sur la probabilité ou sur le délai) ;
- Si la méthode de sélection est applicable dans des scénarios urbains, linéaires ou les deux ;
- Si elle est assistée ou non par des BMs (*Beacon-assisted* ou *Beaconless*) ;

- Si elle nécessite ou non l'aide de l'infrastructure routière ;
- Et enfin, sa gestion des déconnexions fréquentes dues à la grande mobilité des véhicules ou lorsque la densité de véhicules est faible.

2.4 Protocoles de diffusion basés sur le délai

Dans cette section, nous examinons une sélection de protocoles basés sur le délai, conçus pour la diffusion multi-sauts dans les réseaux véhiculaires. Comme mentionné précédemment, ces protocoles peuvent être classés en protocoles basés sur le récepteur, sur l'émetteur ou hybrides.

2.4.1 Protocoles basés sur le récepteur

Parmi les protocoles basés sur le récepteur, certains protocoles utilisent le mécanisme de poignée de main RTB/CTB (*Request-To-Broadcast / Clear-To-Broadcast*). Dans ces protocoles, avant de transmettre l'EM, le relayeur actuel diffuse un message RTB. Le véhicule récepteur de ce message, dont l'emplacement se trouve dans la direction de diffusion, devient un FC et participe donc à une phase de contention pour être sélectionné comme prochain relayeur. La portion de route dans la direction de diffusion et dans la portée de transmission du relayeur actuel est divisée en segments. Divers mécanismes sont utilisés pour sélectionner un segment potentiel, et enfin permettre à un véhicule sélectionné situé dans ce segment de répondre au relayeur actuel en envoyant un message CTB [28, 15, 38, 6, 8].

Ce mécanisme de poignée de main permet de sélectionner un seul relayeur parmi les véhicules qui reçoivent l'EM du même véhicule émetteur, et réduit ainsi l'effet du problème des nœuds cachés. Cependant, le mécanisme RTB/CTB peut être répété plusieurs fois en raison des pertes de paquets. Ainsi, les protocoles basés sur ce mécanisme connaissent des temps de latence plus élevés lorsque la densité de véhicules est élevée. D'autre part, l'utilisation des paquets de contrôle RTB et CTB crée une surcharge de réseau supplémentaire. Par conséquent, le mécanisme RTB/CTB est considéré comme inefficace lorsque la taille du message de diffusion est petite [47], ce qui est le cas pour les EMs.

Dans le protocole UMB (*Urban Multi-hop Broadcast*) [28], chaque FC participe à la phase de contention en émettant un signal de brouillage (le signal *black-burst*) pendant une période de temps proportionnelle à la distance entre son segment et le relayeur actuel. A la fin de cette période, le FC vérifie l'état du canal. Si le canal est détecté inactif, il envoie le message CTB. Dans le cas contraire, le véhicule sort de

la phase de contention. Lorsque plusieurs messages CTB sont envoyés, les véhicules qui ont envoyé ces messages doivent rejoindre une phase de résolution de collision qui permet finalement de ne sélectionner qu'un seul véhicule. Après avoir reçu avec succès le message CTB, le relayeur actuel transmet l'EM et attend un accusé de réception (ACK) du relayeur nouvellement sélectionné. Contrairement à l'UMB, le protocole SB (*Smart Broadcast*) [15] utilise une phase de résolution de collision basée sur le dimensionnement des fenêtres de contention pour réduire le délai de rediffusion. Les FCs, dans chaque segment, choisissent aléatoirement une valeur de backoff dans la fenêtre de contention attribuée à ce segment.

Le protocole BPAB (*Binary-Partition-Assisted Broadcast*) [38] cherche à rendre le temps de latence constant en introduisant une approche basée sur la partition binaire. Le protocole BPAB divise de manière itérative la zone située dans la portée de transmission. Dans chaque itération, le *black-burst* est utilisé pour éliminer un segment non potentiel de toute considération ultérieure. Après un nombre fixe d'itérations, un véhicule situé dans le segment le plus étroit est choisi au hasard comme prochain relayeur.

Pour réduire le délai de transmission des EMs et diminuer le nombre de messages redondants, le protocole UMBP (*Urban Multi-hop Broadcast Protocol*) [6] comprend un nouveau schéma de sélection du véhicule relayeur qui utilise des mécanismes de partition itérative, de mini-slot, de *black-burst* et de contention asynchrone. L'UMBP sélectionne des véhicules voisins éloignés, puis un seul véhicule relayeur est choisi avec succès par la contention asynchrone entre eux. De plus, trois stratégies de diffusion (diffusion bidirectionnelle, diffusion multidirectionnelle et diffusion directionnelle) sont conçues en fonction de la position de l'émetteur de l'EM afin de sélectionner rapidement un seul relayeur dans chaque direction de la route pour diffuser l'EM reçu. Dans [8], la méthode complète de sélection des véhicules relayeurs sur la route en courbe est proposée pour une diffusion rapide des messages et une couverture complète de la route en courbe. De plus, une métrique du taux de courbure est définie pour décrire quantitativement le degré de courbure de la route.

Pour éviter les inconvénients du mécanisme RTB/CTB, d'autres protocoles basés sur le récepteur exploitent différents types d'informations pour sélectionner directement les véhicules relayeurs [25, 46, 35, 48, 10, 2]. Dans ces protocoles, chaque véhicule recevant l'EM est un FC. Il détermine un temps d'attente avant retransmission qui est généralement inversement proportionnel à une priorité. Cette priorité prend généralement en compte la distance du récepteur par rapport à l'émetteur pour assurer une progression rapide de la diffusion, mais peut tout aussi bien prendre en compte d'autres facteurs. Ainsi, les prochains relayeurs sont sélectionnés par conten-

tion entre les FCs en fonction de leurs différents temps d'attente.

Dans l'algorithme de retransmission en zone basé sur la contention (*Area contention-based forwarding algorithm*) du protocole GeoNetworking [25], le véhicule récepteur d'un EM détermine un temps d'attente avant de retransmettre le message reçu, qui est inversement proportionnel à la distance de l'émetteur. Ainsi, le véhicule dont la progression de la diffusion est maximale aura le temps d'attente le plus faible. Lorsque l'EM est reçu une seconde fois par un véhicule avant l'expiration de son temps d'attente, ce véhicule annule sa retransmission prévue.

Le protocole UV-CAST (*Urban Vehicular BroadCAST*) [46] traite à la fois les problèmes de tempête de diffusion et de réseau déconnecté. Sa méthode de sélection utilise un temps d'attente avant retransmission qui dépend de la distance de l'émetteur et favorise les véhicules aux intersections. UV-CAST est un protocole assisté par les BMs. Pour soutenir la gestion des réseaux déconnectés, il utilise des accusés de réception implicites intégrés aux BMs pour identifier les véhicules qui n'ont pas été informés de l'EM. À la réception d'un BM provenant d'un véhicule voisin non informé, les véhicules affectés à la tâche SCF rediffusent immédiatement l'EM.

Dans le protocole HyDiAck [35], une zone de retransmission est définie en fonction de la position du véhicule émetteur et du véhicule d'origine. Les véhicules qui se trouvent à l'intérieur de la zone de retransmission ont une priorité plus élevée que les véhicules se trouvant à l'extérieur de cette zone pour transmettre le message. HyDiAck utilise également des accusés de réception implicites. Cependant, contrairement au protocole UV-CAST dans lequel seul un sous-ensemble de véhicules effectue la tâche SCF, dans HyDiAck, tous les véhicules effectuent cette tâche jusqu'à ce qu'ils quittent la zone de diffusion (RoI) ou que la durée de vie du message expire. En outre, les véhicules ne retransmettent pas immédiatement l'EM mais après un délai afin de réduire le nombre de retransmissions redondantes.

Le mécanisme de sélection du protocole RCP (*Road-Casting Protocol*) [48] donne plus de chances d'être sélectionné comme prochain relayeur aux véhicules qui traversent une intersection afin de résoudre le problème de la non-ligne de vue. En plus d'un facteur de distance, le protocole RCP prend également en compte la qualité de la liaison lors de la sélection des relayeurs afin d'éviter de choisir des véhicules dont la liaison est de mauvaise qualité.

L'objectif du protocole EDDP (*Efficient multi-directional Data Dissemination Protocol*) [10] est de réaliser une diffusion efficace des données dans un environnement urbain véhiculaire sans s'appuyer sur les BMs. À cette fin, EDDP s'appuie sur l'estimation de la densité du trafic. Cette estimation est basée uniquement sur les données de vitesse de manière à exploiter la relation vitesse-densité : la vitesse

moyenne diminue lorsque la densité augmente, qui est le plus descriptif du comportement du conducteur.

Plutôt que d'utiliser un timer dont le délai d'expiration détermine le temps d'attente du FC avant la rediffusion de l'EM, le protocole IFP (*Intelligent Forwarding Protocol*) [2] est construit sur un mécanisme basé sur une fenêtre de contention. Un tel mécanisme permet au FC de différer sa rediffusion en ajustant la taille maximale de sa propre fenêtre de contention. En outre, IFP introduit un mécanisme amélioré de résolution des collisions et un processus d'accusé de réception totalement indépendant et découplé de la progression de la propagation du message.

La mise en clusters dans les réseaux véhiculaires permet une utilisation raisonnable des ressources disponibles du réseau [16]. Les approches de clustering créent une organisation hiérarchique du réseau en regroupant ses véhicules en un ensemble de clusters avec un coordinateur central pour chaque cluster. Ce coordinateur est appelé chef de cluster (CH : *Cluster Head*) et est sélectionné en fonction des caractéristiques multiples des véhicules. Certains protocoles basés sur le récepteur utilisent l'organisation hiérarchique du réseau créée par les techniques de clustering dans leurs méthodes de sélection des prochains relayeurs pour atténuer la congestion du réseau [39, 44]. Le schéma de diffusion des EMs basé sur le clustering proposé dans [39] vise à gérer efficacement le problème des tempêtes de diffusion. Dans ce schéma, le CH rediffuse immédiatement les EMs reçus. Tandis que pour les membres du cluster (CM : *Cluster Member*), une technique de suppression de diffusions basée sur une barrière temporelle est utilisée pour réduire le niveau de congestion du réseau. Grâce à cette technique, le véhicule le plus éloigné du véhicule émetteur est plus susceptible de retransmettre l'EM reçu.

Dans [44], les auteurs proposent un nouveau schéma de diffusion à surcharge réduite appelé RBO-EM (*Reduced Broadcast Overhead scheme for Emergency Message dissemination*). Pour améliorer la stabilité des clusters, RBO-EM exploite les mesures de mobilité pour réduire la surcharge des communications et augmenter la fiabilité de la transmission des messages dans les scénarios de grande mobilité. De plus, une métrique estimée de la stabilité des liens est introduite pour sélectionner une passerelle fiable pour la communication inter-clusters, et ainsi éviter la congestion du réseau.

2.4.2 Protocoles basés sur l'émetteur

Les protocoles basés sur l'émetteur contrôlent la contention entre les FCs. Sur la base des informations de voisinage, le véhicule émetteur désigne des FCs avec des priorités différentes et intègre sa décision au message de diffusion. A la réception du

message de diffusion, seuls les véhicules désignés par l'émetteur peuvent participer à la contention en déterminant les délais avant retransmission en fonction de leurs priorités pré-assignées [32, 47, 52, 5].

Pour maximiser la vitesse de transmission, le protocole MCROB (*Multiple Candidate Relays Opportunistic Broadcast*) [32] utilise une métrique de diffusion qui prédit cette vitesse (ETS : *Expected Transmission Speed*) pour choisir les FCs et leur attribuer des priorités. Dans le protocole ROFF (*RObust and Fast Forwarding*) [47], un FC obtient sa priorité de retransmission en utilisant un bitmap qui décrit la distribution des espaces vides entre les véhicules pour éviter les retards inutiles dans le processus de contention. En outre, le protocole ROFF empêche que la différence de temps d'attente des FCs soit plus courte que la limite inférieure prédéfinie afin d'éviter les collisions.

Le protocole AFB (*Adaptive Fast Broadcast*) [52] utilise une structure de contrôle basée sur un index et un algorithme de partition du segment d'intérêt (SoI) de la rue pour minimiser la taille des informations de contrôle. Pour garantir les exigences de fiabilité de diffusion prédéfinies à chaque saut, le schéma REMD (*Reliable Emergency Message Dissemination*) [5] sélectionne plusieurs relayeurs en fonction de la qualité de leur liaison de réception et de leur position. Les relayeurs effectuent en coopération un nombre optimal de répétitions de diffusion et se coordonnent pour sélectionner les relayeurs du prochain saut.

2.4.3 Protocoles hybrides

Les protocoles basés sur les récepteurs peuvent souffrir de collisions en raison de la différence de temps d'attente entre les véhicules adjacents, qui peut être trop courte. En outre, en raison du problème de l'espace vide entre les véhicules adjacents, ils peuvent également subir des retards inutiles dans le processus de contention. En revanche, dans les protocoles basés sur l'émetteur, l'efficacité des priorités pré-assignées aux FCs est affectée par la nature très dynamique des réseaux véhiculaires. Par conséquent, certains protocoles combinent les schémas de sélection basés sur l'émetteur et sur le récepteur [25, 36, 54].

L'algorithme de retransmission *Advanced GeoBroadcast* du protocole GeoNetworking [25] inclut les mécanismes définis dans l'algorithme de retransmission en zone basé sur la contention, mentionné ci-dessus, et l'algorithme d'acheminement *Greedy Forwarding*, qui est utilisé pour acheminer un paquet vers une destination (c'est-à-dire algorithme d'acheminement unicast). *Advanced GeoBroadcast* améliore l'efficacité et la fiabilité de la diffusion en choisissant les relayeurs potentiels uniquement dans un secteur spécifique de la zone de couverture de l'émetteur, et par un

TABLE 2.1 – Principales caractéristiques des protocoles connexes

	Décision basée sur			Scénario			Assistée par des BMs	Gère les déconnexions
	Récepteur	Émetteur	Hybride	Urbain	Linéaire	Hybride		
[28]	✓					✓		
[15]	✓				✓			
[38]	✓					✓		
[6]	✓					✓		
[8]	✓				✓			
[25]*	✓			✓				
[46]	✓			✓			✓	✓
[35]	✓			✓			✓	✓
[48]	✓			✓				
[10]	✓			✓				
[2]	✓				✓			
[39]	✓			✓			✓	
[44]	✓				✓		✓	
[32]		✓			✓		✓	
[47]		✓			✓		✓	
[52]		✓			✓		✓	
[5]		✓		✓			✓	
[25]**			✓	✓			✓	
[36]			✓	✓			✓	
[54]			✓	✓			✓	✓

* L'algorithme de retransmission en zone basé sur la contention.

** L'algorithme *Advanced GeoBroadcast*.

schéma de retransmission contrôlée des paquets à l'intérieur de la RoI.

Dans le protocole AddP (*Adaptive Data Dissemination Protocol*) [36], l'émetteur désigne parmi ses voisins un seul véhicule en fonction de sa distance et de sa densité locale pour retransmettre le message de diffusion. Si un véhicule voisin n'a pas entendu la retransmission du véhicule désigné, il participe à une contention basée sur le délai pour sélectionner les prochains relayeurs. Dans [54], les auteurs proposent deux protocoles, BPD-D et BPD-E, qui utilisent le schéma BPD (*Broadcast scheme based on the Prediction of Dynamics*). BPD-D et BPD-E mettent en œuvre, respectivement, la métrique du délai restant attendu (D) pour minimiser le délai de la diffusion et la métrique de l'efficacité de rediffusion attendue (E) pour maximiser l'efficacité de la diffusion.

Les principales caractéristiques de conception des protocoles examinés dans ce chapitre sont résumées dans le tableau 2.1.

2.5 Conclusion

La diffusion joue un rôle essentiel dans la distribution de messages d'urgence pour les applications de sûreté routière. En revanche, les protocoles de diffusion

sont confrontés à plusieurs défis importants, notamment le problème des tempêtes de diffusion et de la fragmentation du réseau. Par conséquent, ces problèmes doivent être traités par des schémas de diffusion afin d'éviter la perte de paquets pendant le processus de diffusion, de minimiser la surcharge de diffusion et de maintenir un processus de diffusion fiable.

Dans ce chapitre, nous avons décrit le contexte de la diffusion multi-sauts dans l'environnement véhiculaire et présenté les principales caractéristiques de conception des protocoles de diffusion. En outre, nous avons examiné une sélection de protocoles de diffusion existants qui sont directement liés à nos contributions. Cependant, il est toujours difficile d'obtenir une faible surcharge de diffusion tout en maintenant un taux de livraison élevé et un délai de diffusion minimal.

DEUXIÈME PARTIE

Contributions

Mécanisme plus efficace de suppression de diffusions

3.1 Introduction

La congestion du réseau est un problème majeur qui affecte les communications des véhicules connectés et autonomes (CAVs) dans des scénarios de forte densité de véhicules. L'idée commune utilisée par les protocoles de diffusion des messages d'urgence pour surmonter ce défi est de réduire le nombre de retransmissions. Ceci est réalisé en supprimant les retransmissions redondantes tout en maintenant la fiabilité de la diffusion. Dans ce chapitre, nous analysons le problème de la suppression imprécise des retransmissions redondantes dans les protocoles de diffusion basés sur le délai et proposons un nouveau mécanisme de suppression de diffusions plus efficace (uHBS : *unHurried Broadcast Suppression*). Ensuite, nous utilisons le mécanisme proposé comme base pour concevoir uHBS-DP (*uHBS based Dissemination Protocol*), un nouveau protocole basé sur le délai pour la diffusion de messages d'urgence dans les réseaux véhiculaires en milieu urbain.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La section suivante motive ce travail et en définit le contexte. Dans la section 3.3, nous analysons le problème de la suppression imprécise des retransmissions redondantes. Les sections 3.4 et 3.5 fournissent une description détaillée de la solution que nous proposons. Ensuite, les résultats de la simulation sont présentés dans la section 3.6. Enfin, nous concluons ce chapitre dans la section 3.7.

3.2 Motivation

La réduction de la congestion dans les réseaux véhiculaires dans des scénarios de forte densité de véhicules, sans affecter les performances des applications, reste un problème difficile. Pour surmonter ce défi dans les applications liées à la sûreté routière, les protocoles modernes de diffusion de EMs suppriment les retransmissions supposées redondantes à l'aide de mécanismes de suppression de diffusions [10, 1].

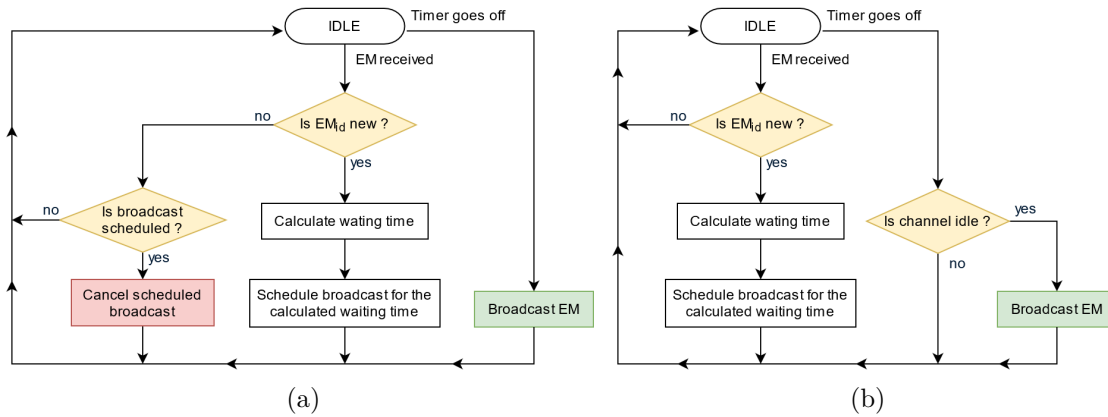


FIGURE 3.1 – Mécanismes de suppression de diffusions. (a) Mécanismes de suppression de diffusions basés sur la réception en double du même message. (b) Mécanismes de suppression de diffusions basés sur l'état du canal.

Ces mécanismes de suppression sont basés sur le mécanisme RTB/CTB, ou l'un des deux moyens par lesquels un FC peut détecter la retransmission du même EM par un autre relayeur :

1. Simplement après avoir reçu le même EM à nouveau ;
2. La détection de l'état occupé du canal après l'expiration du délai d'attente est considéré comme étant dû à une retransmission de l'EM.

Dans les mécanismes de suppression de diffusions basés sur la réception en double du même EM (voir la figure 3.1a), lorsqu'un véhicule reçoit un EM, il vérifie si l'EM reçu est un doublon. Dans le cas où le véhicule reçoit l'EM pour la première fois, et devient donc un FC, il calcule un temps d'attente avant retransmission, puis il programme la retransmission de l'EM en fonction du temps d'attente calculé. Sinon, le véhicule retourne à l'état IDLE après avoir supprimé la retransmission déjà programmée, le cas échéant. Lorsque le temps d'attente expire, le véhicule diffuse directement l'EM et retourne à l'état IDLE [10, 36, 48, 5, 2, 39].

Dans les mécanismes de suppression de diffusions basés sur l'état du canal (voir la figure 3.1b), lorsqu'un véhicule reçoit un EM, il vérifie si l'EM reçu est nouveau. Dans le cas d'une réception en double du même EM, le véhicule le rejette simplement et retourne à l'état IDLE. Sinon, il devient un FC, et calcule donc un temps d'attente avant retransmission, puis il programme la diffusion de l'EM en fonction du temps d'attente calculé. Lorsque la minuterie est déclenchée, si le canal est détecté occupé, le véhicule retourne simplement à l'état IDLE en considérant que l'état occupé du canal est dû à la retransmission de l'EM par un autre relayeur. Sinon, il diffuse l'EM et retourne à l'état IDLE [47, 52].

Par conséquent, l'objectif de ce travail est de proposer un nouveau mécanisme

TABLE 3.1 – Sommaire des notations

Notations	Description
WT_v	Temps d'attente du FC v avant la rediffusion de l'EM
R	Portée de transmission des véhicules
$\text{minDiff}(f, v)$	La différence minimale entre les temps d'attente des FCs voisins f et v
$T_{1\text{-Hop}}(s, v)$	Temps de transmission d'un saut entre deux véhicules s et v
$PT_{s,v}$	Temps de propagation entre deux véhicules s et v
NB	Base de voisinage
NSB_f	Adéquation du FC voisin f pour la rediffusion
$d_{s,f}$	Distance entre les véhicules s et f
Dy_f	Densité locale perçue par le véhicule f
IWT_f	Temps d'attente initial du FC f avant la rediffusion de l'EM
EM_{SFC}	FC sélectionné par l'émetteur de l'EM
IWT_{max}	Valeur seuil de IWT_f
WT_{diff}	Valeur maximale de la différence minimale entre les temps d'attente de deux FCs voisins
PT_{max}	Temps de propagation maximal entre deux véhicules voisins
$T_{\text{Rx/Tx}}$	Temps de commutation Rx/Tx
T_{CCA}	Temps d'évaluation du canal libre
$T_{1\text{-Hop}}$	Temps maximal de transmission d'un saut
CSBS-var	Variante du protocole uHBS-DP qui utilise le mécanisme de suppression de diffusions basé sur l'état du canal
EMRBS-var	Variante du protocole uHBS-DP qui utilise le mécanisme de suppression de diffusions basé sur la réception en double du même EM
VD	Densité de véhicules du réseau

de suppression de diffusions (uHBS) qui bénéficie des deux moyens mentionnés ci-dessus, par lesquels un FC peut détecter la retransmission du même EM par un autre relayeur, pour éviter les suppressions imprécises. Le mécanisme de suppression proposé sera la base d'un nouveau protocole de diffusion (uHBS-DP) pour la diffusion des EMs dans l'environnement des CAVs. Les notations les plus importantes utilisées dans ce chapitre sont résumées dans le tableau 3.1.

3.3 Analyse de la suppression imprécise des transmissions redondantes

Dans les mécanismes de suppression de diffusions basés sur le délai, chaque FC calcule son délai avant de transmettre l'EM en fonction d'une priorité prédéfinie. Le FC supprime sa retransmission programmée lorsqu'il détecte une retransmission du même EM par un autre relayeur. Par conséquent, un FC v doit attendre WT_v , qui désigne le temps d'attente du véhicule v , avant de retransmettre l'EM. Lorsque deux véhicules voisins f et v (c'est-à-dire que la distance qui les sépare est inférieure à la portée de transmission des véhicules désignée par R) reçoivent un EM pour la

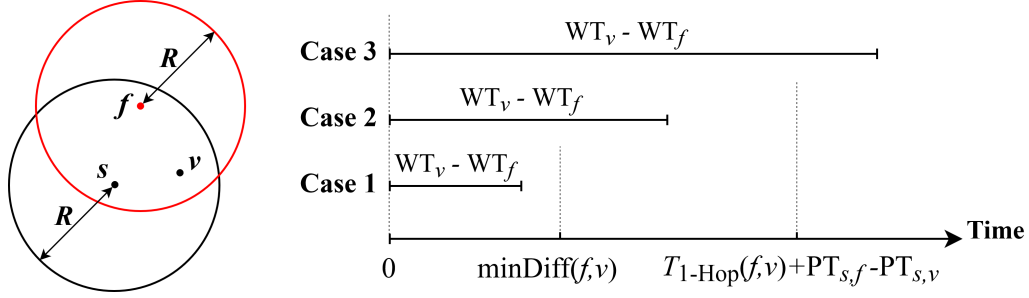


FIGURE 3.2 – Illustration des cas de la différence entre les temps d'attente de deux FCs voisins.

première fois de l'émetteur s , ils déterminent leurs temps d'attente respectifs (WT_f et WT_v) avant de transmettre l'EM. Nous supposons que $\text{WT}_f \leq \text{WT}_v$, que f ne supprimera pas sa retransmission programmée et que v recevra la retransmission effectuée par f . Pour que v détecte le signal de transmission de f avant de commuter son interface en mode de transmission pour relayer l'EM, une différence minimale entre les temps d'attente de f et v est nécessaire. Elle est désignée par $\text{minDiff}(f, v)$ et est étudiée en détail dans [47].

D'une manière générale, en regardant la différence entre les temps d'attente de f et v , on peut distinguer les trois cas suivants (voir la figure 3.2) :

— **Cas 1** : ($\text{WT}_v - \text{WT}_f < \text{minDiff}(f, v)$)

Dans ce cas, la différence entre les temps d'attente de f et v ne permet pas au véhicule v de détecter le signal de transmission de f avant l'expiration de son temps d'attente. En d'autres termes, WT_v expire et le véhicule v fait passer son interface en mode de transmission pour transmettre l'EM avant que le signal de transmission de f ne soit détectable. Par conséquent, le véhicule v ne supprimera pas sa retransmission programmée.

— **Cas 2** : ($\text{WT}_v - \text{WT}_f \geq \text{minDiff}(f, v)$) et
 $(\text{WT}_v - \text{WT}_f < T_{1\text{-Hop}}(f, v) + \text{PT}_{s,f} - \text{PT}_{s,v})$

où $T_{1\text{-Hop}}(f, v)$ désigne le délai d'un saut entre f et v (c'est-à-dire l'intervalle de temps séparant la transmission de l'EM par f et sa réception réussie par v), $\text{PT}_{s,f}$ est le temps de propagation entre s et f (c'est-à-dire le temps nécessaire au signal de transmission pour se déplacer de la source s à la destination f) et $\text{PT}_{s,v}$ est le temps de propagation entre s et v .

Dans ce deuxième cas, à l'expiration de son temps d'attente, v peut détecter le signal de transmission de f en vérifiant l'état du canal, qui devrait apparaître comme occupé. À ce moment-là, la réception de l'EM par v n'est pas encore terminée. Par conséquent, le fait de s'appuyer uniquement sur l'état

d'occupation du canal ne permet pas à un véhicule d'affirmer qu'il est en train de recevoir le même EM que celui reçu précédemment, et il ne peut donc pas supprimer avec précision la retransmission programmée.

— **Cas 3 :** ($\mathbf{WT}_v - \mathbf{WT}_f \geq (T_{1-\text{Hop}}(f, v) + \mathbf{PT}_{s,f} - \mathbf{PT}_{s,v})$)

Dans ce troisième cas, le véhicule v achève la réception de la retransmission de l'EM par f avant l'expiration de son temps d'attente. Ainsi, la rediffusion programmée de l'EM par v peut être supprimée de manière efficace.

Par conséquent, l'analyse ci-dessus de la différence entre les temps d'attente de deux FCs adjacents doit être prise en considération lors de la conception d'un mécanisme efficace de suppression.

3.4 uHBS : Mécanisme non hâtif de suppression de diffusions

Dans les mécanismes existants de suppression de diffusions, un FC suppose qu'une rediffusion est effectuée par un autre relayeur soit après avoir reçu une nouvelle fois le même EM [10, 36, 48, 5, 2, 39], soit il considère que l'état occupé du canal après l'expiration de son temps d'attente est dû à une rediffusion du même EM [47, 52]. Cependant, l'utilisation de la réception en double du même EM comme seul critère pour supprimer la retransmission programmée rend les FCs hâtifs dans leur décision de retransmission, car la réception de l'EM peut être déjà en cours. D'autre part, considérer que l'état occupé du canal est dû à une rediffusion du même EM précédemment reçu n'est pas toujours correct. Même avec un canal entièrement dédié à la transmission des EMs, plusieurs EMs peuvent être diffusés en même temps. Cela se traduit par des suppressions de diffusion hâtives et imprécises.

Afin d'éviter que les FCs ne prennent hâtivement la décision de retransmission ou de suppression de la rediffusion de l'EM, nous proposons un nouveau mécanisme de suppression de diffusions (uHBS). Le mécanisme que nous proposons exploite la réception en double de l'EM en plus d'une métrique d'indication de canal occupé reçue de la couche inférieure (MAC).

L'organigramme et l'algorithme de la figure 3.3 illustrent le fonctionnement du mécanisme uHBS proposé. Lorsqu'un FC reçoit un EM pour la première fois (ligne 2), il calcule un temps d'attente initial avant la retransmission (ligne 3), puis il programme la rediffusion de cet EM en fonction du temps d'attente calculé (ligne 4). Par ailleurs, si cet EM a déjà été reçu (ligne 5), le véhicule récepteur supprime sa retransmission déjà programmée (ligne 7), le cas échéant (ligne 6). En outre, un FC

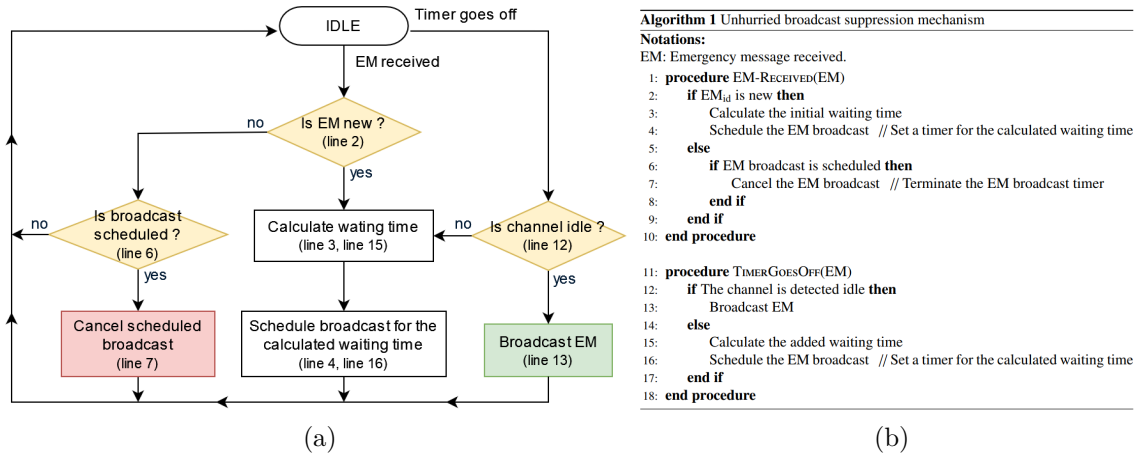


FIGURE 3.3 – Illustration du mécanisme proposé pour la suppression de diffusions. (a) Organigramme. (b) Algorithme.

ne doit pas prendre la décision finale de retransmettre l'EM à l'expiration de son temps d'attente, mais auparavant, il doit également vérifier l'état du canal. Ainsi, si le canal est détecté comme étant inactif (ligne 12), le FC diffuse l'EM (ligne 13). Sinon, il retarde sa rediffusion (lignes 15 et 16) et reporte donc sa décision de retransmission. L'objectif de ce délai est de prendre en compte le cas où la réception d'un EM n'est pas encore achevée afin d'éviter de prendre des décisions d'envoi hâtives et erronées. Cela améliore également l'efficacité de la suppression de diffusions, car le fait de retarder la retransmission augmente la probabilité de recevoir à nouveau le même EM.

Le calcul du temps d'attente initial et de la valeur du temps de report doit tenir compte de l'analyse présentée dans la section 3.3. Dans la section suivante, nous présentons le fonctionnement détaillé de notre protocole de diffusion basé sur le nouveau mécanisme de suppression proposé.

3.5 uHBS-DP : Protocole de diffusion basé sur le mécanisme uHBS

Pour assurer une diffusion efficace des EMs, nous présentons dans cette section un nouveau protocole de diffusion basé sur le délai (uHBS-DP : *uHBS based Dissemination Protocol*) qui utilise le nouveau mécanisme de suppression proposé dans la section précédente (uHBS). Nous présentons d'abord les principes de conception de uHBS-DP, puis nous décrivons en détail son schéma de sélection des prochains relayeurs.

3.5.1 Principes de conception

Notre protocole uHBS-DP est conçu sur la base des hypothèses suivantes :

- Chaque véhicule est équipé d'un récepteur GPS (*Global Positioning System*) qui lui permet d'obtenir des informations sur sa position ;
- La portée de transmission est la même pour tous les véhicules ;
- Chaque véhicule maintient une base de connaissances locale (base de voisinage, désignée par NB), qui contient les informations échangées entre voisins à l'aide des BM. Ces messages périodiques contiennent la position GPS actuelle, la densité locale perçue par le véhicule (c'est-à-dire la taille de sa base de voisinage) et d'autres informations pertinentes pour la sensibilisation du voisinage.

Afin de réduire les retransmissions redondantes et les conflits d'accès au canal, et donc de résoudre le problème des tempêtes de diffusion, uHBS-DP sélectionne à chaque saut un nombre limité de véhicules pour retransmettre l'EM. Ce mécanisme de sélection est hybride car il combine une sélection effectuée par l'émetteur avec une contention, basée sur un délai d'attente, entre les récepteurs du message. En outre, uHBS-DP utilise le mécanisme uHBS décrit dans la section précédente. Ce mécanisme permet à tout FC de retarder sa retransmission s'il détecte que le canal est occupé à l'expiration de son délai d'attente, et de ne prendre la décision finale de supprimer sa retransmission que lorsqu'il reçoit à nouveau le même EM. Ci-après, nous discutons le schéma de sélection des relayeurs suivants adopté dans uHBS-DP.

3.5.2 Schéma hybride de sélection des relayeurs

Pour réduire les délais de dissémination et améliorer le taux de livraison du message diffusé, le véhicule émetteur d'un EM utilise la distance euclidienne et la densité locale de véhicules pour sélectionner le relayeur suivant le plus approprié. La position d'un véhicule, prise en compte dans le calcul des distances, et sa densité locale sont des informations partagées entre voisins à l'aide des BMs. Pour chaque véhicule voisin f , le véhicule émetteur s calcule une valeur d'adéquation du voisin pour la rediffusion, désignée par NSB_f , en utilisant l'équation (3.1).

$$NSB_f = \begin{cases} \frac{\min(d_{s,f}, R)}{R} + Dy_f & \text{si } (d_{s,f} > \frac{R}{4}) \\ \frac{d_{s,f}}{R} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

où $d_{s,f}$ est la distance entre les véhicules s et f , et Dy_f est la densité locale perçue par le véhicule f .

Le véhicule voisin ayant la valeur NSB_f la plus élevée sera sélectionné comme le relayer suivant le plus approprié. Pour les véhicules voisins dont la distance est supérieure à un quart de la portée de transmission, la densité locale est le principal facteur de calcul de leurs valeurs NSB_f , tandis que la distance, $d_{s,f}$, est utilisée pour donner la priorité au véhicule le plus éloigné parmi les véhicules ayant la même densité locale. Cependant, la densité locale n'est pas considérée comme un facteur de sélection pour les autres véhicules voisins (c'est-à-dire les véhicules dont la distance est inférieure à un quart de la portée de transmission). Cela évite d'augmenter le nombre de sauts de diffusion en sélectionnant un voisin très proche, ce qui augmente le délai de dissémination. Le résultat de cette première phase de sélection est intégré dans l'EM avant sa retransmission.

Dans la deuxième phase de sélection du protocole uHBS-DP, chaque récepteur d'un EM est un FC. Il retransmet le message s'il ne l'a pas reçu à nouveau d'un autre relayer avant l'expiration de son temps d'attente. Ce dernier est constitué d'un temps d'attente initial auquel s'ajoutent d'éventuels reports dus à l'occupation du canal. Le temps d'attente initial d'un FC f avant retransmission, noté IWT_f , est calculé en fonction du résultat de la première phase de sélection à l'aide de l'équation (3.2).

$$IWT_f = \begin{cases} 0 & \text{si}(f = EM_{SFC}) \\ \text{Random}[0, IWT_{\max}] & \text{si}(EM_{SFC} = \text{Null}) \\ \text{Random}[WT_{\text{diff}}, IWT_{\max}] & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

uHBS-DP permet au FC sélectionné par l'émetteur (EM_{SFC}) de commencer la retransmission sans aucun délai (c'est-à-dire que le temps d'attente initial est égal à zéro). Pour les autres récepteurs, le temps d'attente initial est inférieur au paramètre IWT_{\max} . Il doit également être, si un autre FC est sélectionné par l'émetteur, suffisamment long pour que le signal de transmission du relayer sélectionné puisse être détecté avant son expiration. Le calcul de ce temps d'attente minimal, désigné par WT_{diff} , est similaire à celui de la différence minimale entre les temps d'attente de deux FCs adjacents (c'est-à-dire $\text{minDiff}(f, v)$) [47]. La différence réside dans le fait que nous voulons calculer un seuil maximum pour deux FCs voisins. WT_{diff} est calculé selon l'équation (3.3).

$$WT_{\text{diff}} = 2PT_{\max} + T_{R_x/T_x} + T_{CCA} \quad (3.3)$$

où PT_{\max} est le temps de propagation maximal entre deux véhicules voisins (c'est-à-dire le temps de propagation entre deux véhicules dont la distance entre eux est égale à la portée de transmission R); T_{R_x/T_x} est le temps de transition de la couche

PHY de l'état de réception à l'état de transmission (*Rx/Tx turnaround time*) et T_{CCA} est le temps nécessaire pour accéder au canal de transmission et déterminer s'il est disponible (CCA : *Clear Channel Assessment*).

Lorsqu'ils retardent une rediffusion en raison de l'occupation du canal, les FCs reportent leur rediffusion d'un délai de T_{1-Hop} , où T_{1-Hop} désigne le délai d'un saut entre deux véhicules séparés par une distance égale à R [53]. Ce temps de report permet, avant son expiration, d'achever la réception du message en cours. Par conséquent, ce message sera pris en considération dans la décision de retransmission de l'EM.

3.6 Évaluation des performances

Afin d'évaluer les performances de notre protocole uHBS-DP, nous avons réalisé une série d'expériences de simulation. L'évaluation des performances se déroule en deux étapes. Tout d'abord, nous montrons le gain obtenu en utilisant le nouveau mécanisme de suppression proposé. Dans cette étape, uHBS-DP est comparé à deux de ses variantes qui utilisent des mécanismes de suppression de diffusions conventionnels. La première variante, appelée CSBS-var, utilise un mécanisme de suppression de diffusions basé sur l'état du canal, tandis que le mécanisme de suppression de la seconde variante, appelée EMRBS-var, est basé uniquement sur la réception d'une nouvelle fois du même EM. Dans un deuxième temps, nous comparons uHBS-DP à un protocole de pointe reconnu pour son efficacité, à savoir AddP [36]. En plus de son efficacité, le choix du protocole AddP est également motivé par ses caractéristiques de conception qui sont similaires à celles de notre protocole uHBS-DP. Les deux protocoles sont assistés par des BMs, utilisent des mécanismes de sélection hybrides (c'est-à-dire que la décision sur la priorité à devenir relayeur est partagée entre l'émetteur et le récepteur) et sont conçus pour fonctionner dans des scénarios urbains. Dans ce qui suit, la section 3.6.1 présente l'environnement et les paramètres de simulation. Les mesures de performance considérées pour l'évaluation sont présentées dans la Section 3.6.2. Enfin, la section 3.6.3 décrit et analyse les résultats de simulation obtenus.

3.6.1 Configuration de simulation

Pour réaliser notre évaluation dans un environnement de simulation réaliste, nous avons utilisé le simulateur de trafic routier SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) [29] sur une portion de 3,6 km² du réseau routier de Manhattan (Figure 3.4)

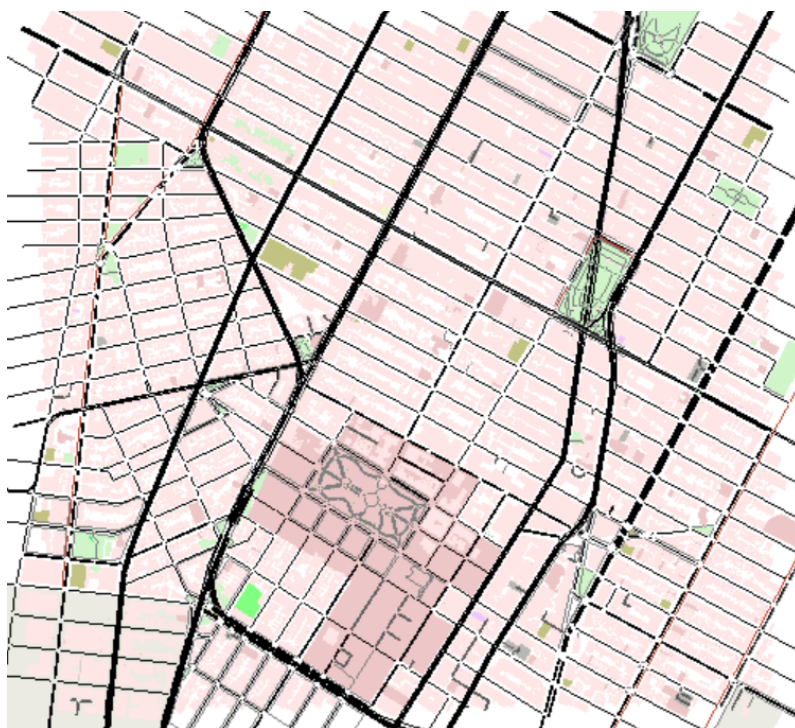


FIGURE 3.4 – Illustration de la carte routière de Manhattan utilisée dans l'évaluation.

importée d'OpenStreetMap¹. Nous avons également utilisé le cadre de simulation de réseaux véhiculaires Veins (*Vehicles in Network Simulation*) [43], qui couple de manière bidirectionnelle le simulateur de trafic routier SUMO avec le simulateur de réseau OMNeT++ [45], leur permettant de communiquer au moment de l'exécution via le protocole TraCI (*Traffic Control Interface*). Nous avons conservé les limites de vitesse spécifiées pour chaque voie ou route du réseau, importées dans SUMO depuis OpenStreetMap. SUMO utilise par défaut le modèle de suivi de véhicules de Krauss pour calculer la vitesse de sécurité de chaque véhicule afin d'éviter les collisions entre véhicules [2]. Veins comprend les modèles de la pile IEEE 802.11p DSRC/WAVE conçus pour être utilisés dans les réseaux véhiculaires. Dans nos simulations, nous avons activé un modèle d'ombrage des obstacles qui a été calibré et validé par des mesures réelles [42]. De plus, le modèle d'évanouissement Nakagami-m est activé pour refléter la propagation par trajets multiples dans les environnements urbains [47]. Nous avons également ajusté la puissance de transmission et la sensibilité de réception afin d'obtenir une portée de transmission d'environ 330 mètres, ce qui est représentatif des réseaux véhiculaires en milieu urbain [34].

Habituellement, le taux d'occupation du canal (CBR : *Channel Busy Ratio*) est considéré comme le résultat des différentes densités de véhicules sans tenir compte

1. openstreetmap.org

TABLE 3.2 – Paramètres de simulation

	Parameter	Value
IEEE 802.11p	Channel data rate	6Mbps
	Transmission power	16mW
	Receiver sensitivity	-88dBm
	Noise	-98dBm
	Path loss model	Free-space
	Shadowing model	Obstacle model
	Multi-path propagation	Nakagami-m fading
	CCAThreshold	-65dBm
	Maximum interference distance	1000 m
DSRC/WAVE	EM size	128bytes
	BM size	32bytes
	Beacon interval	0.1s
uHBS-DP	T_{1-Hop}	247 μ s
	WT_{diff}	15 μ s
	WT_{max}	2ms
Scenarios	Urban area scenario	Manhattan city
	Region of Interest	1900m \times 1900m
	Vehicle density	250, 500 and 750 veh./km ²
	Channel Busy Ratio	10%, 20%, 30% and 40%
	Simulation time	0.3s with a warm-up period
	Number of repetitions	10
	Confidence level	95%

de la charge du trafic échangé, autre que les BMs. Dans nos simulations, nous avons découplé les paramètres de densité de véhicules (VD : *Vehicle Density*) et de CBR en simulant la charge réseau de messages échangés. Cela nous a permis d'évaluer des scénarios où la densité de véhicules est faible alors que le CBR est élevé, ainsi que des scénarios où la densité de véhicules est élevée mais pas nécessairement avec un CBR élevé. Le tableau 3.2 présente les principaux paramètres de simulation et leurs valeurs correspondantes.

3.6.2 Mesures de performance

Pour évaluer uHBS-DP en termes d'évolutivité, de fiabilité, de surcharge générée et d'efficacité, nous avons évalué les quatre mesures de performance suivantes pour différents CBR et différentes densités de véhicules :

1. Taux de collision (CR : *Collision Ratio*) : CR est utilisé pour mesurer le niveau de contention du canal. Il est défini comme le rapport entre le nombre total de paquets perdus pendant la transmission et le nombre total de paquets transmis par tous les véhicules. La minimisation du CR vise à minimiser l'effet

négatif du problème des tempêtes de diffusion.

$$CR = \frac{\text{number of Rx/Tx lost packets}}{\text{number of transmitted packets by all vehicles}} \quad (3.4)$$

2. Taux de livraison (DR : *Delivery Ratio*) : cette mesure correspond à la proportion de véhicules dans la région d'intérêt qui reçoivent avec succès l'EM [37]. Les protocoles fiables de diffusion des EMs doivent atteindre un taux de livraison élevé.

$$DR = \frac{\text{number of vehicles successfully receiving EM}}{\text{number of vehicles in the RoI}} \quad (3.5)$$

3. Surcharge de diffusion (BO : *Broadcast Overhead*) : pour un EM source diffusé dans le réseau, BO calcule le rapport entre le nombre total des EMs insérés dans le réseau et le nombre de véhicules qui ont reçu le message avec succès. Cette métrique permet de mesurer le coût moyen pour informer un seul véhicule.

$$BO = \frac{\text{number of EM transmitted by all vehicles}}{\text{number of vehicles successfully receiving EM}} \quad (3.6)$$

4. Délai de dissémination (DD : *Dissemination Delay*) : il s'agit du temps moyen nécessaire à un EM pour se déplacer du véhicule d'origine vers d'autres véhicules dans la région d'intérêt [36]. Une diffusion efficace des EMs nécessite un délai de dissémination court.

$$DD = \text{average}(\text{EM reception time} - \text{EM initial time}) \quad (3.7)$$

3.6.3 Résultats de simulation

Dans cette section, nous analysons d'abord les résultats de la comparaison de notre protocole uHBS-DP avec ses deux variantes CSBS-var et EMRBS-var selon les métriques CR, DR et BO (Figure 3.5, Figure 3.6 et Figure 3.7), puis nous discutons des résultats de la comparaison de l'uHBS-DP avec le protocole AddP selon les métriques CR, DR, BO et DD (Figure 3.8, Figure 3.9, Figure 3.10 et Figure 3.11).

La figure 3.5 montre le taux de collision pour différents CBR et différentes densités de véhicules. Ce taux donne, pour chaque véhicule, le nombre moyen de paquets qui ne sont pas décodés avec succès pour chaque paquet transmis, ce qui indique le niveau de contention du canal. En plus du taux de collision de uHBS-DP et de ses deux variantes, la figure 3.5 montre également le taux de collision sans diffusion d'EM

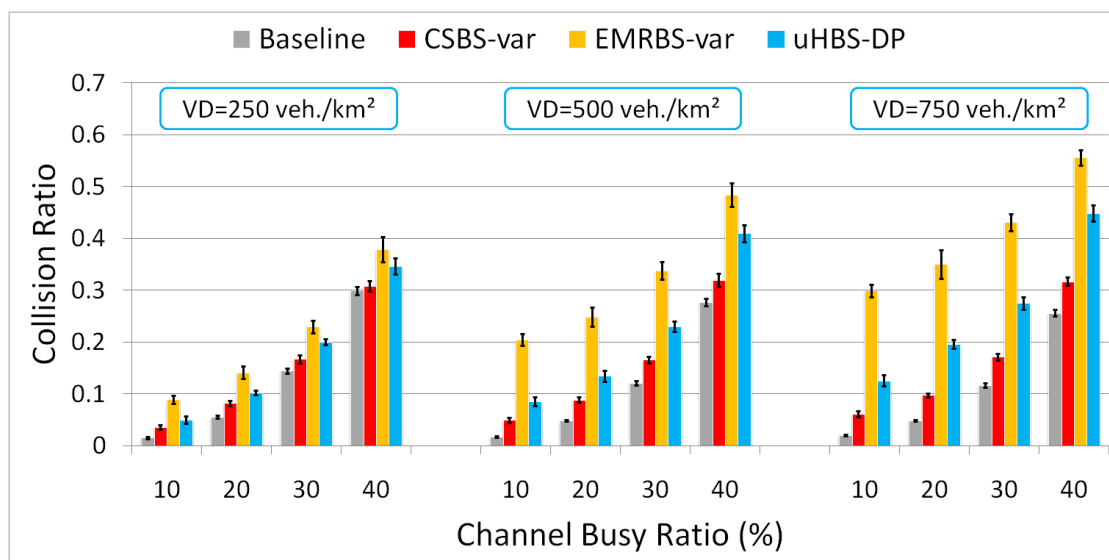


FIGURE 3.5 – Comparaison du taux de collision obtenu par uHBS-DP et ses deux variantes : EMRBS-var et CSBS-var.

qui représente la base de référence pour comparer les taux de collision des autres protocoles. Nous pouvons clairement observer une tendance à la hausse du taux de collision de tous les protocoles (c'est-à-dire uHBS-DP, CSBS-var et EMRBS-var) en fonction de la densité de véhicules pour un CBR donné, ainsi qu'une tendance à la hausse en fonction du CBR pour une densité de véhicules donnée. La densité de véhicules dans le réseau est proportionnelle à la densité moyenne de voisins à un saut observée par un seul véhicule (c'est-à-dire la densité locale de véhicules), et le CBR reflète la charge de messages causée par les véhicules voisins, donc l'augmentation de l'un ou l'autre paramètre augmente le taux de collision dû à la contention du canal.

La variante EMRBS-var utilise un mécanisme de suppression basé uniquement sur la réception en double du même EM, ce qui rend la décision de retransmission des FCs hâtive car une réception en double peut être en cours et n'est pas encore achevée. Par conséquent, le taux de collision de EMRBS-var est le plus élevé de tous les protocoles, indépendamment du CBR et de la densité de véhicules du réseau. Dans notre protocole uHBS-DP, un FC ne prend pas la décision finale de retransmettre l'EM à l'expiration de son temps d'attente s'il détecte à ce moment-là que le canal est occupé. Au lieu de cela, le FC reporte sa décision de retransmettre pour prendre en compte le message dont la réception n'est pas encore achevée. Cela permet à l'uHBS-DP d'améliorer la suppression de diffusions et conduit ainsi à une réduction moyenne du taux de collision, par rapport à la variante EMRBS-var, de 43,86%, 51,50% et 49,72% à des densités de 250, 500 et 750 véh/km², respectivement.

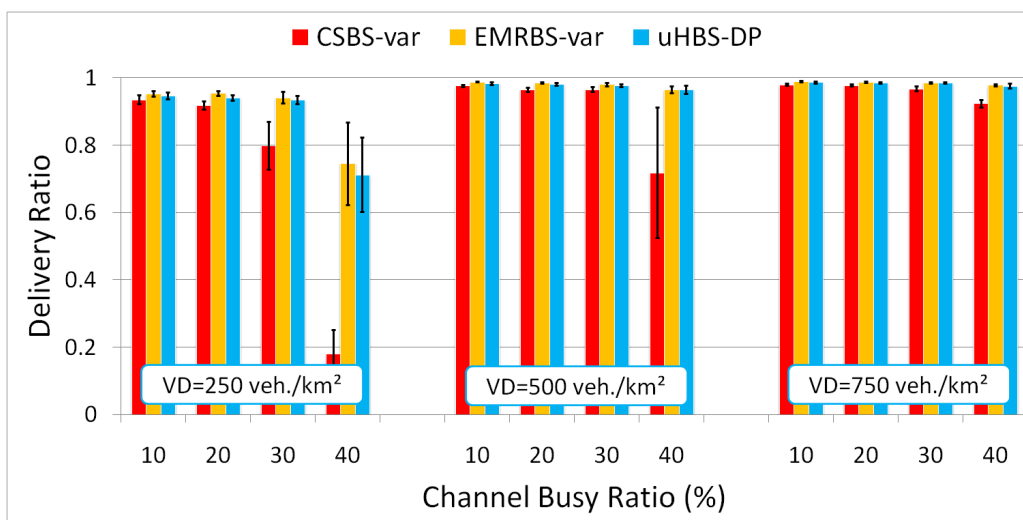


FIGURE 3.6 – Comparaison du taux de livraison obtenu par uHBS-DP et ses deux variantes : EMRBS-var et CSBS-var.

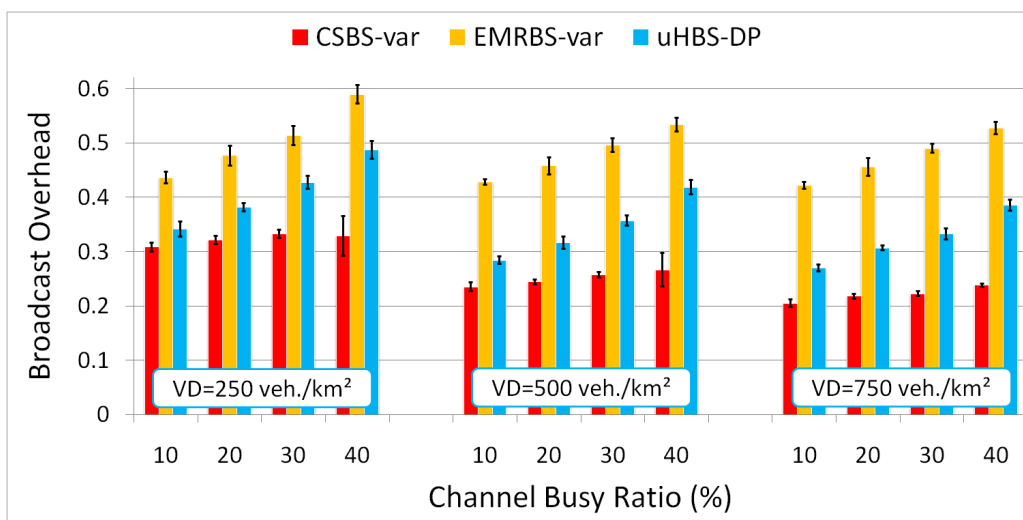


FIGURE 3.7 – Comparaison de la surcharge de diffusion obtenue par uHBS-DP et ses deux variantes : EMRBS-var et CSBS-var.

Dans la variante CSBS-var, le mécanisme de suppression est basé sur l'état du canal. Chaque FC supprime sa retransmission programmée si, après l'expiration de son délai d'attente, le canal est détecté comme étant occupé. Par conséquent, comparé aux protocoles EMRBS-var et uHBS-DP, CSBS-var a le plus faible taux de collision. Cependant, supposer que l'état de canal occupé est toujours dû à une retransmission du même EM conduit à une suppression de diffusions inexacte. Ces suppressions hâtives affectent la fiabilité de la diffusion, ce qui est reflété par le faible taux de livraison obtenu par rapport aux autres protocoles (voir la figure 3.6), et explique également la faible surcharge de diffusion en termes de nombre de retransmissions nécessaires pour délivrer un EM à un seul véhicule (voir la figure 3.7).

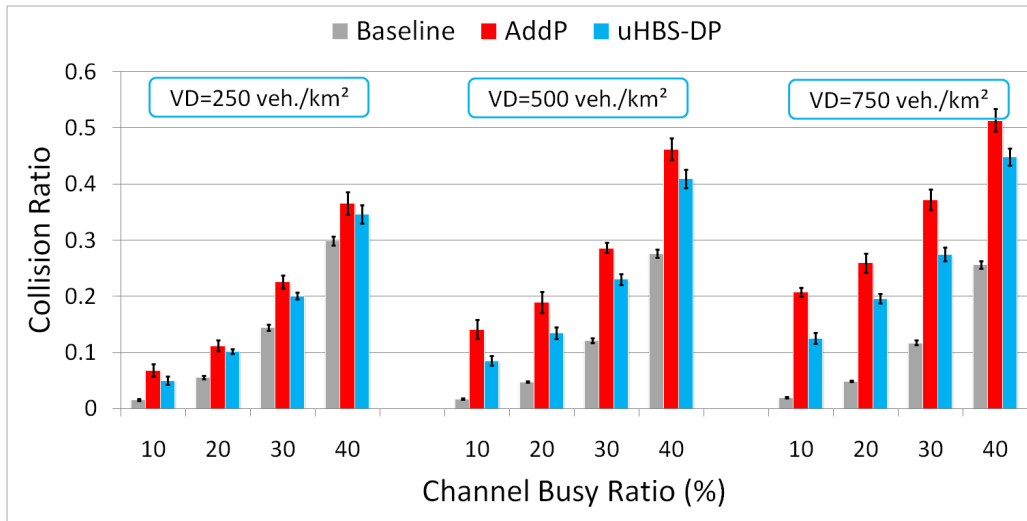


FIGURE 3.8 – Taux de collision : AddP vs. uHBS-DP.

Nous pouvons également observer sur la figure 3.6 que les taux de livraison des protocoles EMRBS-var et uHBS-DP sont similaires dans toutes les expériences avec un petit avantage pour EMRBS-var. Cela peut s’expliquer par la surcharge de diffusion très élevée générée par EMRBS-var par rapport à celle de uHBS-DP, comme le montre la figure 3.7. L’amélioration moyenne obtenue par uHBS-DP en termes de réduction de la surcharge de diffusion par rapport à la variante EMRBS-var est de 18,99%, 28,56% et 31,95% à des densités de 250, 500 et 750 véh./km², respectivement.

D’après les résultats de ces premières expériences de simulation, nous pouvons remarquer que CSBS-var a le plus faible taux de collision, ainsi que la plus faible surcharge de diffusion en termes de nombre de retransmissions par rapport à EMRBS-var et uHBS-DP. Cependant, ces performances ont été obtenues au détriment de la fiabilité du protocole. D’autre part, EMRBS-var garantit une fiabilité de diffusion élevée similaire à celle de uHBS-DP, mais avec le taux de collision le plus élevé et la surcharge de diffusion la plus importante en termes de nombre de retransmissions. Ainsi, par rapport à ses variantes CSBS-var et EMRBS-var, uHBS-DP est le protocole qui offre une fiabilité élevée avec une faible surcharge de diffusion, et donc le meilleur rapport fiabilité/surcharge de diffusion.

Ensuite, nous analysons les résultats de la comparaison entre notre protocole uHBS-DP et le protocole de pointe AddP [36]. En plus du taux de collision d’AddP et d’uHBS-DP, la figure 3.8 montre également le taux de collision dans un test de base sans diffusion d’EM. Comme pour le protocole uHBS-DP, le taux de collision du protocole AddP a tendance à augmenter avec la densité de véhicules pour un CBR donné, ainsi qu’avec le CBR pour une densité de véhicules donnée. Cependant, le

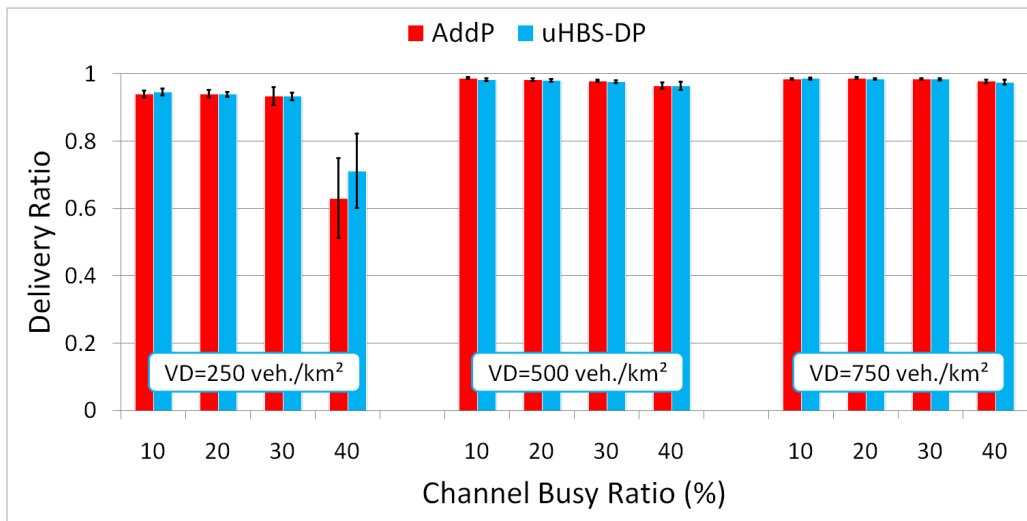


FIGURE 3.9 – Taux de livraison : AddP vs. uHBS-DP.

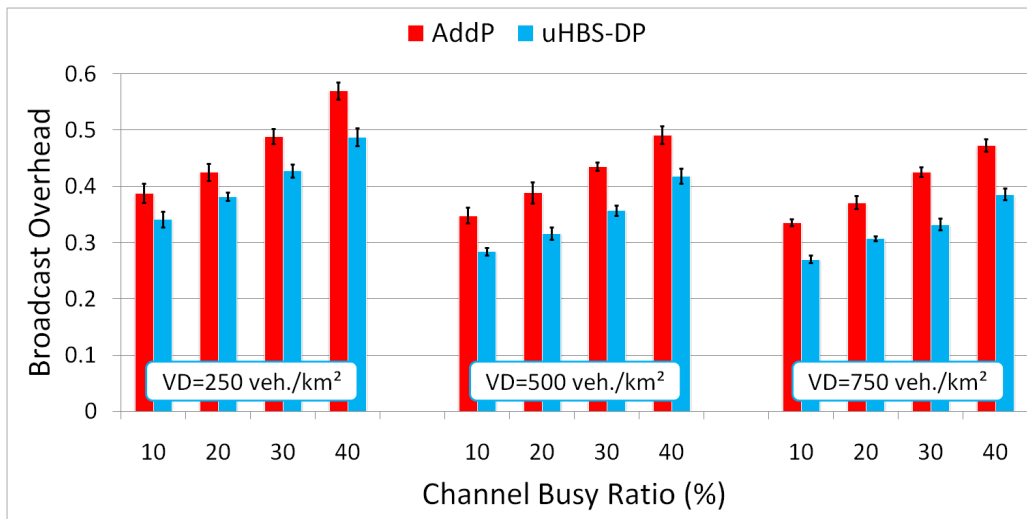


FIGURE 3.10 – Surcharge de diffusion : AddP vs. uHBS-DP.

schéma de suppression utilisé par uHBS-DP lui permet d'atténuer la contention du canal et donc de réduire le taux de collision en évitant les décisions hâtives de retransmettre l'EM. Pour des densités de 250, 500 et 750 véh./km², uHBS-DP réduit le taux de collision en moyenne par rapport au protocole AddP de 28,42%, 36,57% et 34,36%, respectivement.

La figure 3.9 illustre le taux de livraison des protocoles AddP et uHBS-DP pour différents CBR et différentes densités de véhicules. Nous pouvons observer que le taux de livraison atteint est affecté négativement pour les deux protocoles lorsque la densité de véhicules est faible, et que cet effet devient plus important lorsque le CBR augmente. Cela est dû aux schémas de sélection de relayeurs utilisés dans les deux protocoles, qui diminuent leur niveau de performance dans les scénarios

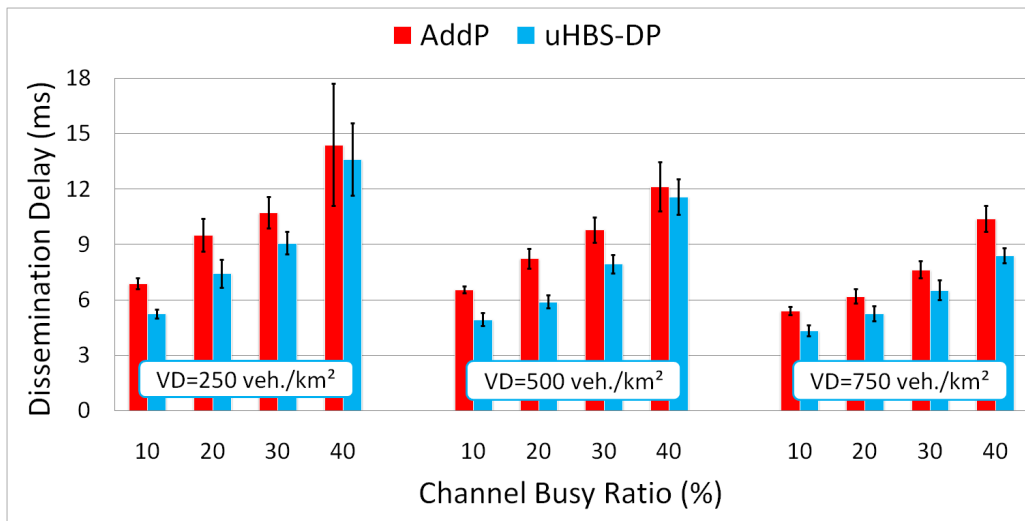


FIGURE 3.11 – Délai de dissémination : AddP vs. uHBS-DP.

de faible densité de véhicules. En outre, le CBR élevé dans ce cas détériore davantage l'efficacité des schémas de sélection en raison des pertes de paquets causées par les collisions encourues. Nous pouvons également observer que les performances obtenues par les deux protocoles sont similaires dans toutes les expériences avec un petit avantage pour uHBS-DP, malgré sa faible surcharge de diffusion par rapport à celle d'AddP, comme le montre la figure 3.10. Cela signifie que notre protocole supprime les retransmissions redondantes plus efficacement par rapport à AddP et assure ainsi une fiabilité de diffusion élevée avec une faible surcharge. L'amélioration moyenne obtenue par uHBS-DP en termes de réduction de la surcharge de diffusion par rapport au protocole AddP est de 12,30%, 17,44% et 19,28% pour des densités de 250, 500 et 750 véh./km², respectivement.

En plus de la fiabilité, la diffusion des EMs nécessite également un délai de dissémination court. La figure 3.11 montre que le délai de dissémination de notre protocole uHBS-DP est meilleur que celui du protocole AddP dans toutes les expériences, indépendamment du CBR et de la densité de véhicules dans le réseau. Cette amélioration, obtenue par notre protocole uHBS-DP, est due à son mécanisme plus efficace de suppression des retransmissions redondantes qui atténue la contention du canal et réduit ainsi le nombre de sauts pour atteindre les récepteurs prévus. Pour des densités de 250, 500 et 750 véh./km², uHBS-DP réduit le délai de diffusion en moyenne par rapport au protocole AddP de 16,65%, 19,17% et 17,21%, respectivement.

3.7 Conclusion

Les principales contributions présentées dans ce chapitre peuvent être résumées comme suit :

1. Analyser le problème de la suppression imprécise des transmissions redondantes dans les protocoles de diffusion basés sur le délai.
2. Conception d'un nouveau mécanisme de suppression de diffusions qui améliore la suppression des transmissions redondantes par rapport aux mécanismes conventionnels.
3. Développer un nouveau protocole, basé sur le nouveau mécanisme de suppression proposé, pour la diffusion de messages d'urgence dans les réseaux urbains de véhicules.
4. Effectuer une évaluation rigoureuse des performances de notre protocole de diffusion proposé à travers des expériences de simulation.

Les résultats de simulation montrent que notre protocole uHBS-DP, qui utilise le mécanisme de suppression de diffusions proposé, améliore considérablement l'efficacité de la diffusion des messages d'urgence en garantissant une fiabilité élevée avec une faible surcharge de diffusion, par rapport à ses deux variantes qui utilisent des mécanismes de suppression conventionnels. En outre, les résultats montrent une amélioration substantielle, par rapport à un protocole bien connu, en termes de réduction du taux de collision (jusqu'à 36,57%), de réduction du délai de dissémination (jusqu'à 19,17%) et de réduction de la surcharge de diffusion (jusqu'à 19,28%). Le travail présenté dans ce chapitre est accepté pour être publié dans la revue scientifique *Ad Hoc Networks* [17].

Schéma évolutif de diffusion basé sur la répartition temporelle

4.1 Introduction

La technologie des véhicules connectés et autonomes (CAVs) promet de révolutionner le secteur des transports en résolvant de nombreux problèmes de sûreté routière et d'efficacité du trafic tout en améliorant considérablement le confort des passagers et des conducteurs. La plupart de ces applications reposent sur la diffusion multi-sauts d'informations entre les véhicules, ce qui entraîne une augmentation de la contention du canal et donc de la probabilité de collisions en raison de la bande passante limitée disponible pour les communications véhiculaires. Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau schéma de diffusion basé sur la répartition temporelle (TDB : *Time-Division based Broadcast scheme*) pour atténuer les interférences provenant de nœuds cachés (c'est-à-dire des véhicules) afin de répondre aux exigences strictes des applications de sûreté routière. Ensuite, nous utilisons ce schéma de diffusion comme base pour concevoir un nouveau protocole efficace et évolutif pour la diffusion de messages d'urgence dans les réseaux urbains de véhicules (UV-TDB : *an Urban, Vehicular and Time-Division-based Broadcast protocol*).

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La section suivante présente la motivation essentielle de ce travail. Les sections 4.3 et 4.4 fournissent une description détaillée de la solution que nous proposons. Dans la section 4.5, nous discutons et analysons les résultats de simulation obtenus. Enfin, nous concluons ce chapitre dans la section 4.6.

4.2 Motivation

Pour tenir compte du problème des interférences provenant de nœuds cachés, il faut distinguer deux types d'interférences :

1. Les interférences provenant des relayeurs suivants du même émetteur ;

TABLE 4.1 – Sommaire des notations

Notations	Descriptions
EM_{RoI}	Région d'intérêt de l'EM
EM_{Pos}	Position du véhicule d'origine de l'EM
t_0	Heure de la première diffusion
R	Portée de transmission des véhicules
$Zone_i$	Zone délimitée par les deux cercles de rayon iR et $(i + 1)R$
Φ	Rayon du cercle qui couvre EM_{RoI}
ΔT	Créneau horaire alloué à chaque classe de zones
τ_f	Délai supplémentaire du FC f
τ_{max}	Valeur seuil de τ_f
$ZT_{n,f}$	Temps d'attente du FC f jusqu'au futur créneau horaire numéro n
n	Numéro d'un futur créneau horaire ($n \geq 0$)
CN_f	Numéro de classe de la zone où se trouve le FC f
$d_{i,j}$	Distance entre les véhicules i et j
PT	Temps de propagation
PT_{max}	Temps de propagation maximal entre deux véhicules voisins
T_{trans}	Temps de transmission
T_{MPD}	Délai de traitement MAC
T_{CCA}	Temps d'évaluation du canal libre
$T_{\text{Rx/Tx}}$	Temps de commutation Rx/Tx
$T_{1\text{-Hop}}$	Temps maximal de transmission d'un saut
CT_{MAC}	Délai maximal introduit par le contrôle de congestion au niveau MAC
WT_f	Temps d'attente du FC f avant la rediffusion de l'EM
NSB_f	Adéquation du véhicule voisin f pour la rediffusion
Dy_f	Densité locale perçue par le véhicule f
$\delta_{s,f}$	La distance entre l'émetteur s et la position la plus proche dans la zone où se trouve le FC f
WT_{diff}	Valeur maximale de la différence minimale entre les temps d'attente de deux FCs voisins
EMB	Base de messages d'urgence
NB	Base de voisinage

2. Les interférences provenant de tous les relayeurs, indépendamment de l'émetteur précédent.

En analysant la façon dont les protocoles de diffusion existants traitent ce problème, nous pouvons constater que les protocoles basés sur la poignée de main RTB/CTB traitent le problème du premier type d'interférences en sélectionnant un seul relayeur. Les protocoles basés sur l'émetteur peuvent également traiter le problème du premier type d'interférences en garantissant une différence suffisamment longue entre les temps d'attente des véhicules désignés pour éviter le chevauchement de leurs transmissions. En revanche, le problème du deuxième type d'interférences n'est pas directement traité par les protocoles de diffusion existants. Ils s'appuient uniquement sur la réduction du nombre de retransmissions pour atténuer leur impact. C'est pourquoi le protocole que nous proposons est destiné à résoudre ce problème. Les notations les plus importantes utilisées dans ce chapitre sont résumées

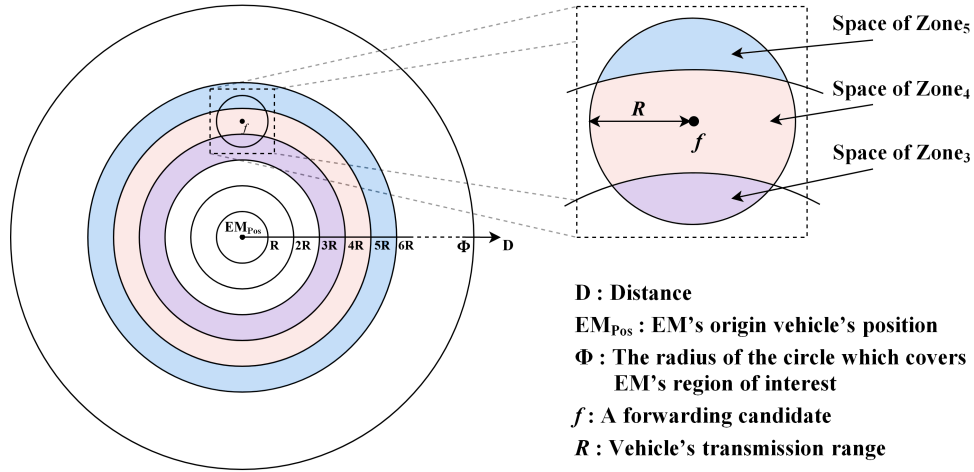


FIGURE 4.1 – Illustration de la définition des zones dans le schéma TDB.

dans le tableau 4.1.

4.3 TDB : Schéma de diffusion basé sur la répartition temporelle

L'objectif de l'introduction du schéma TDB est d'atténuer les interférences provenant de nœuds cachés en organisant mieux les transmissions des relayeurs. Il est basé sur un temps d'attente attribué aux FCs pour planifier leurs transmissions. Pour ce faire, la région d'intérêt d'un EM, notée EM_{RoI} , est divisée en plusieurs zones en forme de bande circulaire. Une zone est délimitée par deux cercles centrés sur la position du véhicule d'origine de l'EM (désigné par EM_{Pos}) au moment de sa première diffusion (désigné par t_0). Les valeurs EM_{Pos} et t_0 sont intégrées à l'EM. La largeur de chaque zone est la différence entre le rayon du cercle extérieur et celui du cercle intérieur, et est égale à la portée de transmission des véhicules (désignée par R). La zone de couverture d'un FC au sein d'un EM_{RoI} est divisée en deux ou trois espaces, chacun d'entre eux est situé dans une zone différente. Si l'on désigne par $Zone_i$ la zone délimitée par les deux cercles de rayon iR et $(i+1)R$, alors la zone de couverture d'un FC situé dans $Zone_i$ est divisée entre $Zone_{i-1}$, $Zone_i$ et $Zone_{i+1}$ (voir l'exemple illustré du FC f situé dans $Zone_4$ sur la figure 4.1). Les zones de couverture des FCs situés dans $Zone_0$ sont divisées entre les deux zones $Zone_0$ et $Zone_1$. Le cercle de rayon Φ est le cercle qui couvre EM_{RoI} . Il convient de noter que la définition de l' EM_{RoI} ne fait pas l'objet de ce travail.

Pour s'assurer que les transmissions provenant de différentes zones ne se chevauchent pas à un moment donné, ces transmissions doivent être planifiées. Cette

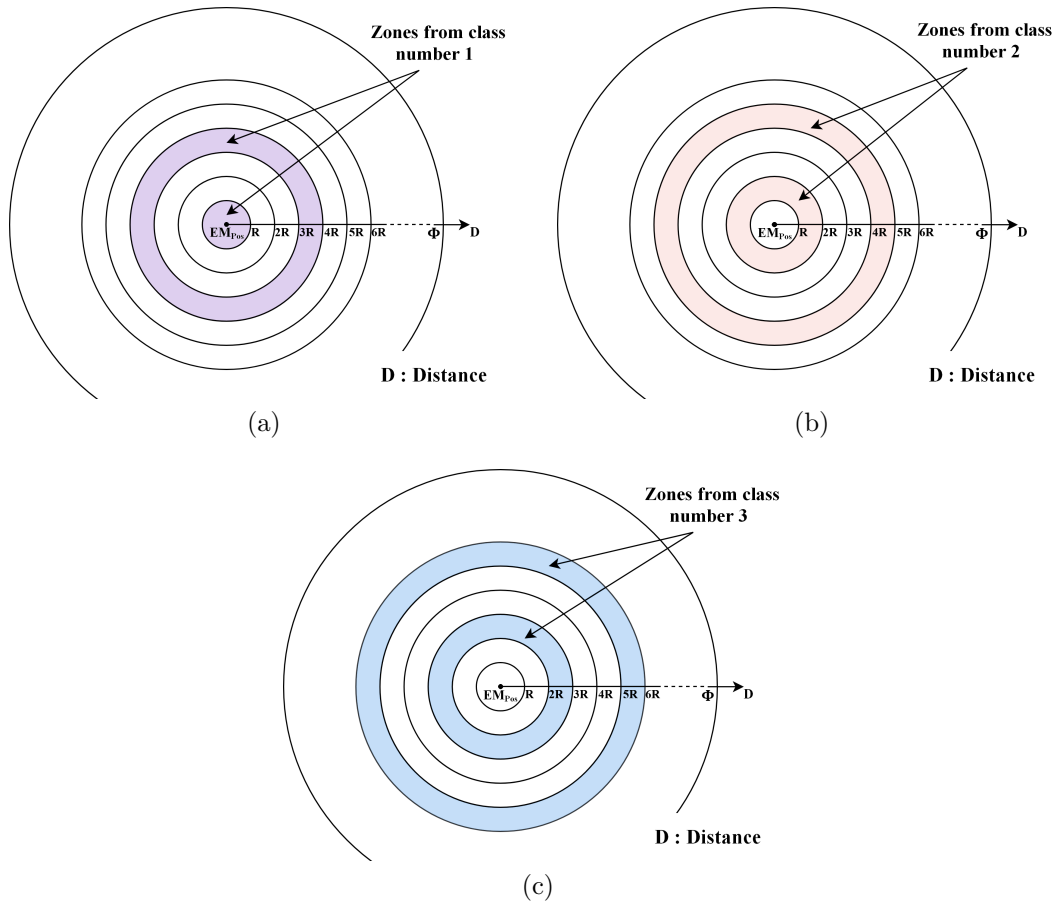


FIGURE 4.2 – Illustration des classes de zones. (a) Classe numéro 1. (b) Classe numéro 2. (c) Classe numéro 3.

planification est basée sur deux points :

1. Les relayeurs des zones séparées par exactement deux autres zones peuvent transmettre simultanément. Ainsi, toutes les zones seront divisées en trois classes.
2. Un créneau horaire périodique est alloué à chaque classe de zones.

La figure 4.2 montre les trois classes de zones. Si l'on désigne par ΔT la valeur du créneau horaire, voici les créneaux horaires attribués à chaque classe :

- Créneaux horaires de la classe numéro 1 :
 $[t_0 + (3i + 1)\Delta T, t_0 + (3i + 2)\Delta T[\quad (i \geq 0).$
- Créneaux horaires de la classe numéro 2 :
 $[t_0 + (3i + 2)\Delta T, t_0 + (3i + 3)\Delta T[\quad (i \geq 0).$
- Créneaux horaires de la classe numéro 3 :
 $[t_0 + (3i + 3)\Delta T, t_0 + (3i + 4)\Delta T[\quad (i \geq 0).$

Le créneau horaire attribué à chaque classe de zones est périodique et a une période de $3\Delta T$. Pour faire face aux scénarios de forte congestion, un délai avant retransmission, noté τ_f , est ajouté à chaque FC f pour éviter le chevauchement des transmissions simultanées des relayeurs situés dans la même zone. Ce délai supplémentaire est limité par la valeur seuil τ_{\max} qui doit être supérieure à la valeur maximale de la différence minimale entre les temps d'attente de deux FCs voisins pour permettre la suppression des retransmissions redondantes [47]. Les valeurs de τ_f et τ_{\max} doivent être définies par les protocoles basés sur le schéma TDB. Un FC f peut calculer le temps d'attente, désigné par $ZT_{n,f}$, jusqu'à un futur créneau horaire alloué à sa zone en utilisant l'équation (4.1).

$$ZT_{n,f} = 3\Delta T \left(\left\lfloor \frac{t - t_0 + \tau_{\max} + (3 - \text{CN}_f)\Delta T}{3\Delta T} \right\rfloor + n \right) + \text{CN}_f\Delta T + t_0 - \tau_{\max} - t \quad (4.1)$$

où n représente le numéro du futur créneau horaire choisi ($n \geq 0$). Par conséquent, si la valeur de n est 0, $ZT_{n,f}$ représente le temps d'attente jusqu'au premier créneau horaire suivant attribué à la zone où se trouve le FC f . Dans l'équation (4.1), t se réfère à l'heure actuelle et CN_f représente le numéro de classe de la zone où se trouve f , qui peut être calculé en utilisant l'équation (4.2).

$$\text{CN}_f = \left\lfloor \frac{d_{\text{origin},f}}{R} \right\rfloor \bmod 3 + 1 \quad (4.2)$$

où $d_{i,j}$ désigne la distance entre les véhicules i et j , et $d_{\text{origin},f}$ est la distance entre le véhicule d'origine à la position EM_{Pos} et le véhicule f .

Nous supposons que le créneau temporel ΔT est suffisant pour la transmission d'un EM jusqu'à sa réception par les destinataires prévus. Ce temps comprend le délai supplémentaire avant retransmission τ_f , le temps de propagation (noté PT), le temps de transmission (noté T_{trans}) et le temps de fonctionnement nécessaire aux couches MAC et PHY. Ce dernier comprend le délai de traitement MAC (MPD : *MAC Processing Delay*), le temps d'évaluation du canal libre (CCA) et le temps de transition de la couche PHY lors du passage de l'état de réception à l'état de transmission (*Rx/Tx turnaround time*) [47], désignés respectivement par T_{MPD} , T_{CCA} et $T_{\text{Rx/Tx}}$. De plus, un délai supplémentaire pourrait se produire en raison du contrôle de congestion au niveau de la couche MAC. Par conséquent, la valeur de ΔT est déterminée comme indiqué dans l'équation (4.3).

$$\Delta T = \tau_{\max} + \text{CT}_{\text{MAC}} + T_{1\text{-Hop}} \quad (4.3)$$

où CT_{MAC} est le retard maximal introduit par le contrôle de congestion au niveau de la couche MAC ; et $T_{1\text{-Hop}}$ est le temps maximal de transmission d'un saut qui

peut être calculé de manière similaire à [53] en utilisant l'équation (4.4).

$$T_{1\text{-Hop}} = \max\{PT + T_{\text{trans}} + T_{\text{MPD}} + T_{\text{CCA}} + T_{\text{Rx/Tx}}\} \quad (4.4)$$

où la valeur maximale de PT (désignée par PT_{max}) est obtenue en divisant la distance maximale entre un émetteur et un récepteur (c'est-à-dire la portée de transmission R) par la vitesse de la lumière; la valeur maximale de T_{trans} est calculée pour la taille maximale d'un EM; et les valeurs maximales de T_{MPD} , T_{CCA} et $T_{\text{Rx/Tx}}$ sont définies dans [23].

Dans le contrôle décentralisé de congestion utilisé dans la norme IEEE 802.11p, CT_{MAC} ne peut pas être déterminé en raison du fonctionnement du CSMA/CA. Pour surmonter cette difficulté, une métrique d'indication de canal occupé reçue de la couche MAC peut être utilisée pour tenter d'obtenir une valeur nulle pour CT_{MAC} . Ainsi, tout FC reporte sa retransmission jusqu'à un futur créneau horaire alloué à sa zone actuelle s'il détecte que le canal est occupé au moment de la transmission (c'est-à-dire au moment de l'expiration de son τ_f).

Par conséquent, le temps d'attente du FC f (désigné par WT_f) avant de retransmettre l'EM reçu peut être calculé à l'aide de l'équation (4.5), où la valeur de n doit être déterminée par les protocoles basés sur le schéma TDB.

$$WT_f = ZT_{n,f} + \tau_f \quad (4.5)$$

La figure 4.3 illustre un scénario dans lequel les relayeurs f_1 , f_2 et f_3 rediffusent un EM reçu du relayeur précédent fwd qui se trouve dans Zone_i , où $i > 0$, f_1 est dans Zone_{i+1} , f_2 est dans Zone_{i-1} et f_3 est dans la même zone que fwd (c'est-à-dire Zone_i). Le temps indiqué par T_{recep} est le temps de réception qui est égal au temps de transmission. Nous supposons dans ce scénario que chacun des relayeurs f_1 , f_2 et f_3 rediffuse l'EM dans le premier créneau horaire suivant alloué à sa zone.

En raison de la différence de délai de propagation, les relayeurs f_1 , f_2 et f_3 achèvent la réception de l'EM provenant du relayeur précédent fwd à des moments différents. Lorsqu'un relayeur achèvent la réception du message, il peut obtenir la position EM_{Pos} et le temps t_0 . Ensuite, en fonction du temps de réception t , il calcule le temps d'attente avant retransmission en utilisant l'équation (4.5). Dans ce contexte, la valeur de n est fixée à 0 pour s'assurer que la retransmission du relayeur a lieu dans le premier créneau horaire suivant alloué à sa zone actuelle. Une fois le temps d'attente écoulé, le relayeur retransmet l'EM. Ceci en considérant les temps T_{MPD} , T_{CCA} et $T_{\text{Rx/Tx}}$.

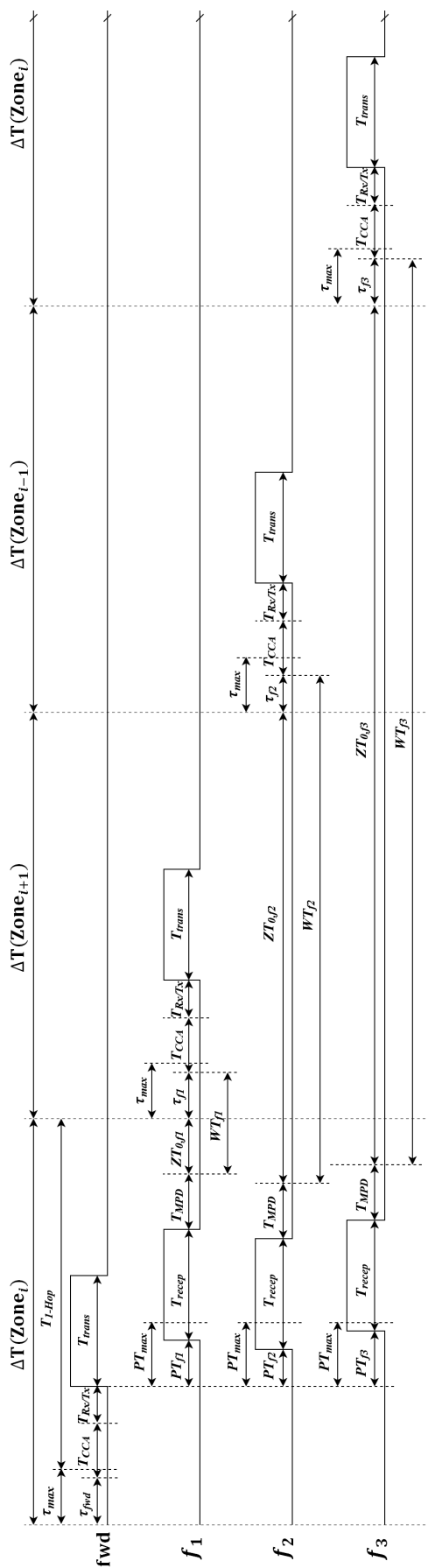


FIGURE 4.3 – Diagramme de temps du schéma TDB (illustration d'un exemple).

4.4 UV-TDB : Protocole de diffusion basé sur le schéma TDB

Une diffusion efficace des EMs nécessite une fiabilité élevée, tout en respectant les contraintes de temps réel et en réduisant les retransmissions redondantes et donc inutiles. Dans cette section, nous présentons le fonctionnement détaillé du protocole de diffusion multi-sauts (UV-TDB) que nous proposons et qui s'appuie sur le schéma TDB discuté précédemment dans la section 4.3.

4.4.1 Principes de conception

L'objectif principal de notre protocole est de réaliser une diffusion efficace des EMs dans une région d'intérêt en surmontant les problèmes associés aux communications véhiculaires, en particulier les tempêtes de diffusion, les déconnexions fréquentes et le problème des nœuds cachés. UV-TDB est conçu selon les hypothèses suivantes :

- Chaque véhicule est équipé d'un récepteur GPS qui permet d'obtenir des informations sur la position du véhicule et de synchroniser son horloge ;
- La portée de transmission est la même pour tous les véhicules ;
- Les BMs sont diffusés périodiquement et contiennent la position GPS actuelle du véhicule, sa densité locale perçue et d'autres informations à partager avec les véhicules voisins pour augmenter le niveau de sensibilisation. Ces messages périodiques permettent à chaque véhicule de créer et de mettre à jour une base locale de voisinage (NB) qui contient les informations pertinentes de ses voisins à un saut.

Pour réduire les retransmissions redondantes et la contention du canal, et ainsi résoudre le problème des tempêtes de diffusion, UV-TDB sélectionne à chaque saut un nombre limité de véhicules pour retransmettre l'EM. Le mécanisme de sélection combine une désignation des FCs les plus appropriés faite par l'émetteur avec une contention basée sur le délai entre les récepteurs du message. Les véhicules qui reçoivent à nouveau le même message annulent leurs retransmissions prévues. En outre, UV-TDB utilise le schéma TDB décrit dans la section précédente, qui permet d'atténuer la contention du canal et les interférences des nœuds cachés. Il utilise également une métrique d'indication d'occupation du canal reçue de la couche inférieure. Ainsi, tout FC reporte sa rediffusion au premier créneau horaire suivant alloué à sa zone actuelle s'il détecte que le canal est occupé au moment de la transmission. Cela améliore encore la suppression de diffusions car le report de la retransmission

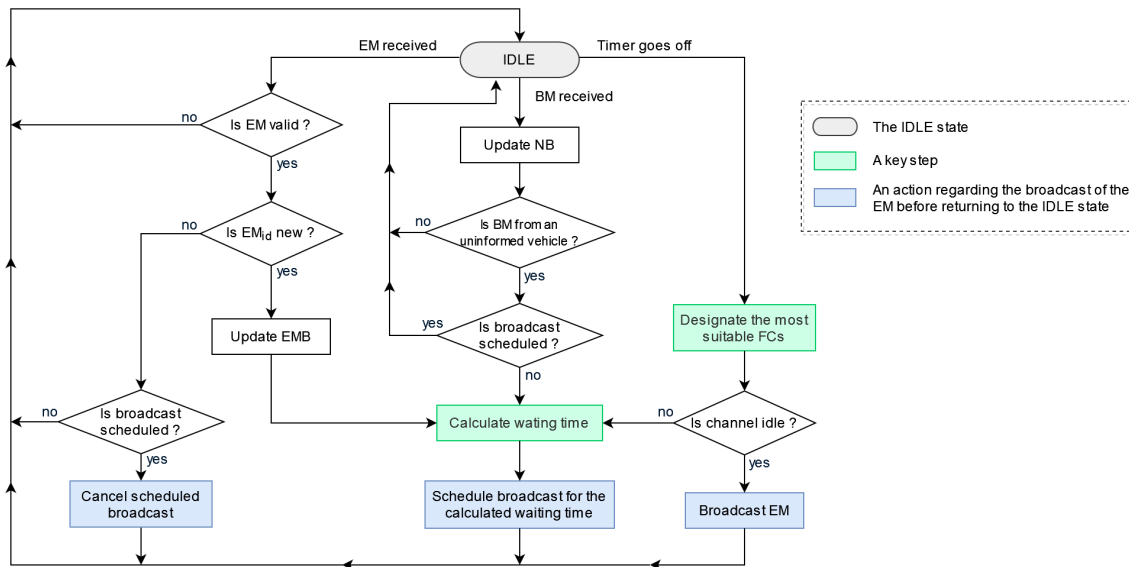


FIGURE 4.4 – Illustration des principales étapes du processus de diffusion du protocole UV-TDB.

augmente la possibilité de recevoir à nouveau le même message et, par conséquent, la possibilité d’annuler la rediffusion. Nous détaillons ci-dessous le mécanisme de sélection adopté dans UV-TDB.

L’autre problème pris en compte par notre protocole est celui des déconnexions fréquentes du réseau. Pour surmonter ce problème et maintenir un processus de diffusion fiable, le mécanisme SCF est adopté. Dans UV-TDB, lorsqu’un nouvel EM est créé ou reçu, le véhicule stocke et transporte le message dans une base de messages d’urgence (EMB) tant que le message est valide, c’est-à-dire jusqu’à ce que le véhicule quitte la région d’intérêt du message ou que la durée de vie du message expire. Cela permet à chaque véhicule d’inclure les identifiants des EMs extraits de son EMB dans les BMs pour annoncer leur réception. Lorsqu’un véhicule reçoit un BM d’un véhicule voisin, il compare les identifiants des EMs inclus dans ce BM avec le contenu de son EMB. Si un EM manquant est détecté, le véhicule récepteur programme une retransmission de ce message si ce n’est pas déjà fait. Cependant, dès qu’un FC reçoit à nouveau le même message pendant sa période d’attente, il annule la rediffusion programmée. Ainsi, notre protocole empêche le processus de diffusion de s’arrêter dans les scénarios de réseaux connectés par intermittence tant que le message est valide.

L’organigramme illustré à la figure 4.4 met en évidence les principales étapes du processus de diffusion des EMs du protocole UV-TDB. Un véhicule à l’état IDLE peut passer à un autre état lorsque l’un des trois événements suivants se produit :

1. Le premier événement est la réception d'un EM par le véhicule. Dans ce cas, le véhicule vérifie d'abord si l'EM est valide, c'est-à-dire si la durée de vie du message n'a pas expiré et si le véhicule se trouve à l'intérieur de la région d'intérêt du message. Si l'EM n'est pas valide, le véhicule le rejette simplement et retourne à l'état IDLE. Sinon, il vérifie si l'EM reçu est un doublon. Le véhicule qui reçoit l'EM pour la première fois et qui devient donc un FC, met à jour son EMB, calcule un temps d'attente avant retransmission et puis programme la rediffusion en fonction du temps d'attente calculé. Lorsque l'EM reçu est un doublon, le véhicule retourne à l'état IDLE après avoir annulé la retransmission déjà programmée, le cas échéant.
2. Le deuxième événement est lorsque le véhicule reçoit un BM d'un véhicule voisin. Dans ce cas, après avoir mis à jour sa base de voisinage, le véhicule programme une rediffusion d'un EM si le BM provient d'un véhicule voisin non informé de cet EM. Cela se produit lorsqu'un EM, stocké dans l'EMB local, ne figure pas dans la liste des identifiants des EM inclus dans le BM reçu et qu'aucune diffusion de cet EM n'est déjà programmée. Sinon, le véhicule retourne à l'état IDLE.
3. Enfin, le troisième événement qui fait sortir un véhicule de l'état IDLE est le déclenchement d'un timeout. Ainsi, le véhicule désigne, parmi ceux de sa base de voisinage, les FCs les plus appropriés pour la rediffusion de l'EM et intègre le résultat de cette désignation à l'EM. Ensuite, il retransmet l'EM si le canal est détecté comme étant inactif, ou reporte sa retransmission dans le cas contraire.

4.4.2 Schéma hybride de sélection des relayeurs

L'un des principaux critères qui détermine l'efficacité d'un protocole de diffusion d'EMs dans les réseaux véhiculaires est la pertinence du schéma de sélection des relayeurs. Notre protocole utilise une méthode de sélection en deux phases. Tout d'abord, et avant de rediffuser l'EM, l'émetteur désigne les prochains FCs les plus appropriés sur la base des informations de sa base de voisinage, et chacun d'entre eux doit se trouver dans une zone différente. Comme décrit précédemment dans la section 4.3, la zone de couverture de tout véhicule dans EM_{ROI} est divisée en deux ou trois zones. Cela permet de désigner jusqu'à trois FCs. Le résultat de cette première phase de sélection est intégré à l'EM avant sa transmission. Dans la deuxième phase, chaque récepteur, et donc un FC, prend en considération l'ensemble des FCs désignés par l'émetteur pour déterminer son temps d'attente avant de rediffuser l'EM reçu.

Ainsi, les prochains relayeurs sont finalement sélectionnés à l'aide d'une contention basée sur le délai entre les FCs.

4.4.2.1 Désignation des candidats à la retransmission les plus appropriés

Pour réduire les délais de transmission de bout en bout et améliorer l'accessibilité des messages de diffusion, le véhicule qui envoie un EM utilise la distance euclidienne et la densité locale de véhicules voisins (c'est-à-dire la taille de sa base de voisinage) pour désigner les prochains FCs les plus appropriés. Les positions des véhicules, prises en compte dans le calcul des distances, et leurs densités locales sont des informations partagées entre voisins à l'aide des BMs. Pour évaluer l'adéquation à la rediffusion, désignée par NSB_f , pour chaque voisin f , le véhicule émetteur s utilise l'équation (4.6), où Dy_f est la densité locale perçue par le véhicule voisin f .

$$NSB_f = \begin{cases} \frac{\min(d_{s,f}, R)}{R} + Dy_f & \text{si } (d_{s,f} > \frac{R}{4}) \\ \frac{d_{s,f}}{R} & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.6)$$

Le véhicule voisin qui présente le plus haut niveau d'adéquation à la rediffusion dans chaque zone sera désigné. Pour les véhicules voisins dont la distance est supérieure à un quart de la portée de transmission, la densité locale est le principal facteur de calcul de la NSB_f , puis le facteur de distance permet de favoriser le véhicule le plus éloigné parmi ceux ayant le même niveau de densité locale. En revanche, la densité locale n'est pas considérée comme un facteur de désignation pour les autres véhicules voisins. Cela permet d'éviter de désigner un voisin très proche et donc d'augmenter le nombre de sauts de diffusion, ce qui augmente le délai de dissémination. L'algorithme de la figure 4.5 résume la procédure utilisée par le véhicule émetteur pour désigner les FCs les plus appropriés avant de rediffuser l'EM.

4.4.2.2 Attribution de temps d'attente aux FCs

Dans UV-TDB, chaque récepteur d'un EM est un FC. Il rediffuse le message s'il ne l'a pas reçu à nouveau avant l'expiration de son temps d'attente. Comme notre protocole utilise le schéma TDB, le temps d'attente avant retransmission est calculé à l'aide de l'équation (4.5). Dans cette équation, il reste à déterminer comment calculer les valeurs de n et τ_f .

La valeur de n détermine dans quel créneau horaire un FC rediffuse l'EM reçu. Elle devrait avoir la valeur 0, qui signifie le premier créneau horaire suivant, pour les véhicules les plus appropriés pour relayer le message et une valeur plus élevée pour les autres véhicules en fonction de leur niveau d'adéquation pour la rediffusion. En

Algorithm 1 Most Suitable Forwarding-Candidates Designation Algorithm

Notations :

NB : One-hop neighbors' base.

CN_{*i*} : Zone class number of vehicle *i*.

NSB_{*i*} : Suitability for broadcasting of neighbor vehicle *i*.

DFS : Set of the designated FCs.

```

1: DFS ← φ;
2: for each vehicle i in NB do
3:   Calculate NSBi based on equation (4.6);
4:   if there is a vehicle j in DFS where CNj = CNi then
5:     if NSBi > NSBj then
6:       Replace j with i in DFS;
7:     end if
8:   else
9:     Add j in DFS;
10:  end if
11: end for

```

FIGURE 4.5 – Algorithme de désignation des candidats à la retransmission les plus appropriés.

fonction de sa densité locale et de sa distance par rapport à l'émetteur *s*, chaque FC *f* calcule sa valeur de *n* en utilisant l'équation (4.7).

$$n = \left\lfloor \frac{n_{\max} \text{Dy}_f}{\text{DyTh}} \left(1 - \frac{\min(d_{s,f}, R) - \delta_{s,f}}{R - \delta_{s,f}} \right) \right\rfloor \quad (4.7)$$

où n_{\max} représente un seuil maximal de *n*; la densité locale Dy_f du FC *f* est inférieure à un seuil configurable DyTh; $\delta_{s,f}$ est la distance entre l'émetteur *s* et la position la plus proche dans la zone où se trouve le FC *f*. Cette distance est la même pour tous les voisins de *s* qui appartiennent à la même classe de zones. $\delta_{s,f}$ peut être calculé à l'aide de l'équation (4.8).

$$\delta_{s,f} = \begin{cases} 0 & \text{si } (\text{CN}_f = \text{CN}_s) \\ R \left(\left\lfloor \frac{d_{\text{origin},s}}{R} \right\rfloor + 1 \right) - d_{\text{origin},s} & \text{si } (\text{CN}_f = (\text{CN}_s \bmod 3) + 1) \\ d_{\text{origin},s} - \left(R \left\lfloor \frac{d_{\text{origin},s}}{R} \right\rfloor \right) & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.8)$$

Lors de la programmation d'une rediffusion après la réception d'un BM d'un véhicule voisin non informé d'un EM (c'est-à-dire qu'un EM manquant est détecté lorsque les identifiants des EMs inclus dans ce BM sont comparés au contenu de la base EMB local), un véhicule récepteur *f* calcule sa valeur de *n* en utilisant

l'équation (4.9).

$$n = \left\lfloor \frac{n_{\max} \text{Dy}_f(\min(d_{s,f}, R) - \delta_{s,f})}{\text{DyTh}(R - \delta_{s,f})} \right\rfloor \quad (4.9)$$

Dans ce cas, s est l'émetteur du BM. En plus de leurs densités locales, l'équation favorise les véhicules les plus proches de s . De plus, lors du report d'une rediffusion en raison de l'occupation du canal, les véhicules choisissent le premier créneau suivant et donc la valeur 0 pour n .

Les FCs de la même zone évitent le chevauchement des transmissions simultanées en ajoutant un délai supplémentaire avant retransmission. Chaque FC f calcule son délai supplémentaire τ_f en utilisant l'équation (4.10).

$$\tau_f = \begin{cases} 0 & \text{si } (f \in \text{EM}_{\text{DFS}}) \\ \text{Random}[\text{WT}_{\text{diff}}, \tau_{\max}] & \text{si } (\exists i \in \text{EM}_{\text{DFS}} | \text{CN}_i = \text{CN}_f) \\ \text{Random}[0, \tau_{\max}] & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.10)$$

UV-TDB permet à chaque FC de l'ensemble des FCs désignés par l'émetteur, dénoté par EM_{DFS} , de commencer la retransmission sans délai supplémentaire. Pour les autres récepteurs, le délai supplémentaire est inférieur au paramètre configurable τ_{\max} . Ce délai doit également, s'il existe un autre FC dans EM_{DFS} qui a le même numéro de classe de zones, être suffisamment long pour qu'avant son expiration le signal de transmission du FC désigné puisse être détecté. Dans ce cas, le calcul du temps d'attente minimal, noté WT_{diff} , est similaire à celui de la différence minimale entre les temps d'attente de deux FCs adjacents utilisé dans [47]. La principale différence est que nous voulons calculer un seuil maximal pour deux FCs voisins. WT_{diff} est calculé en utilisant l'équation (4.11).

$$\text{WT}_{\text{diff}} = 2\text{PT}_{\max} + T_{\text{Rx}/\text{Tx}} + T_{\text{CCA}} \quad (4.11)$$

La figure 4.6 montre des exemples d'attribution de délais supplémentaires aux FCs en fonction de leur position. Les sous-figures 4.6(a1), 4.6(b1) et 4.6(c1) montrent les cas où aucun véhicule n'est désigné par l'émetteur s dans Zone_{i+1} , Zone_{i-1} et Zone_i respectivement, tandis que les sous-figures 4.6(a2), 4.6(b2) et 4.6(c2) montrent les cas où les véhicules f_1 , f_2 et f_3 sont désignés par l'émetteur s dans Zone_{i+1} , Zone_{i-1} et Zone_i , respectivement.

Enfin, lorsqu'un FC programme une rediffusion après avoir reçu un BM d'un véhicule voisin non informé d'un EM ou lorsqu'il reporte une rediffusion en raison de l'occupation du canal, il choisit un délai supplémentaire aléatoire compris entre WT_{diff} et τ_{\max} ($\text{Random}[\text{WT}_{\text{diff}}, \tau_{\max}]$).

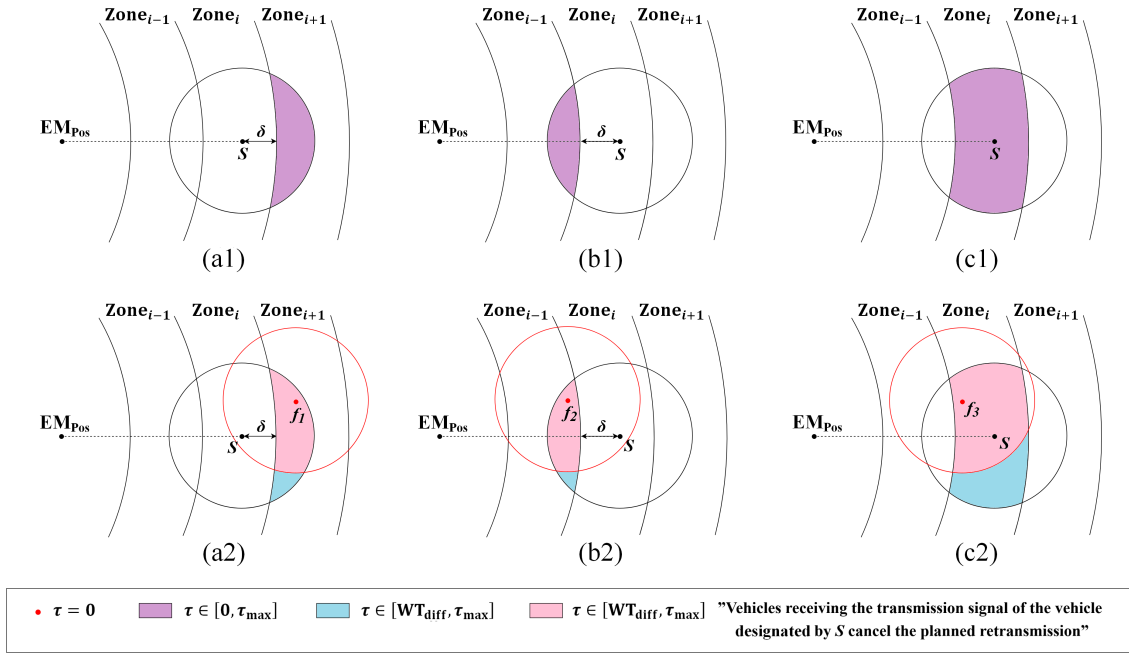


FIGURE 4.6 – Exemples d’attribution de délais supplémentaires.

4.5 Évaluation des performances

Afin d’évaluer les performances de notre protocole UV-TDB, nous l’avons comparé à deux protocoles bien connus, AddP [36] et HyDiAck [35], en utilisant des expériences de simulation. Ces trois protocoles sont assistés par des BMs et sont conçus pour fonctionner dans des scénarios urbains. Dans nos expériences, nous avons évalué deux scénarios avec deux cartes routières différentes (importées d’OpenStreetMap¹). L’une des deux cartes représente une section de 3,6 km² du réseau routier de Manhattan et l’autre est une section de taille similaire de la ville d’Alger. La carte de Manhattan (voir la figure 4.7a) représente un réseau routier en forme de grille, et la carte d’Alger (voir la figure 4.7b) représente un exemple typique d’un réseau routier irrégulier. Nous supposons que l’EM à diffuser est généré par un véhicule situé approximativement au centre du réseau routier. Dans le reste de cette section, nous présentons l’environnement et les paramètres de simulation, les mesures d’évaluation des performances utilisées, en plus de discuter et d’analyser les résultats obtenus.

4.5.1 Configuration de simulation

Pour réaliser notre évaluation dans un environnement de simulation réaliste, nous avons utilisé Veins [43], un cadre de simulation de réseaux véhiculaires qui

1. openstreetmap.org



FIGURE 4.7 – Illustration des cartes routières utilisées dans l'évaluation. (a) Carte routière de Manhattan. (b) Carte routière d'Alger.

couple de manière bidirectionnelle le simulateur de trafic routier SUMO [29] avec le simulateur de réseau OMNeT++ [45] et leur permet de communiquer au moment de l'exécution via le protocole TraCI. Nous avons conservé les mêmes limites de vitesse spécifiées pour chaque voie ou route dans les réseaux importés dans SUMO depuis OpenStreetMap. De plus, pour obtenir un comportement réaliste de suivi de véhicules, SUMO utilise par défaut le modèle de Krauss pour calculer la vitesse de sécurité de chaque véhicule afin d'éviter les collisions entre véhicules [26]. Veins inclut le modèle IEEE 802.11p conçu pour être utilisé dans les réseaux véhiculaires. Il comprend également les modèles des couches supérieures de la pile DSRC/WAVE. Pour tenir compte des effets de l'évanouissement rapide, nous avons utilisé le modèle d'évanouissement Nakagami-m qui est une méthode probabiliste pour refléter la propagation par trajets multiples dans les environnements urbains [47]. Nous avons également ajusté la puissance de transmission et la sensibilité de réception pour obtenir une distance maximale entre deux voisins d'environ 330 mètres, ce qui est représentatif des réseaux véhiculaires en milieu urbain [34]. Cette valeur est utilisée comme portée de transmission des véhicules dans notre simulation. La liste des principaux paramètres de simulation et leurs valeurs correspondantes est donnée dans le tableau 4.2.

4.5.2 Mesures de performance

Nous avons évalué UV-TDB en mesurant son niveau d'évolutivité, sa fiabilité, la surcharge de diffusion générée et son efficacité globale en évaluant les six mesures

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation

	Parameter	Value
IEEE 802.11p	Channel data rate	6 Mbps
	Transmission power	16 mW
	Receiver sensitivity	-88 dBm
	Noise	-98 dBm
	Path loss model	Free-space
	Shadowing model	Obstacle model [42]
	Multi-path propagation	Nakagami-m fading
	CCAThreshold	-65 dBm
	Maximum interference distance	1000 m
DSRC/WAVE	EM size	128 bytes
	BM size	32 bytes
	Beacon interval	0.1 s
UV-TDB	R	330 m
	$T_{1\text{-Hop}}$	247 μs
	n_{max}	15
	DyTh	225 vehicles
	WT_{diff}	15 μs
	τ_{max}	60 μs
Scenarios	Urban area scenarios	Manhattan city, Algiers city
	Region of Interest	1900 m \times 1900 m
	Vehicle density	250, 500, 750 and 1000 veh./km ²
	Simulation time	0.3 s with a warm-up period
	Number of repetitions	10
	Confidence level	95%

de performance décrites ci-dessous sous différentes densités de véhicules.

1. Taux de collision (CR : *Collision Ratio*) : utilisé pour mesurer le niveau de contention du canal, CR est le rapport entre le nombre total de paquets (EMs et BMs) perdus pendant la transmission (c'est-à-dire qui n'ont pas été reçus correctement) et le nombre total de paquets transmis par tous les véhicules. De toute évidence, CR doit rester faible.

$$\text{CR} = \frac{\text{number of Rx/Tx lost packets}}{\text{number of transmitted packets by all vehicles}} \quad (4.12)$$

2. Taux d'interférence (IR : *Interference Rate*) : cette métrique mesure l'effet des interférences sur le taux de réception des paquets. Elle calcule le rapport entre le nombre total de paquets qui ne peuvent pas être décodés en raison des interférences et le nombre de paquets reçus avec succès par tous les véhicules.

$$\text{IR} = \frac{\text{number of undecodable packets due to interference}}{\text{number of successfully received packets by all vehicles}} \quad (4.13)$$

3. Taux de réception des transmissions (TRR : *Transmission Reception Rate*) : il s'agit du rapport entre le nombre d'EMs reçus avec succès et ceux transmis

par tous les véhicules. TRR est utilisé pour mesurer le taux de réception d'un EM par transmission.

$$\text{TRR} = \frac{\text{number of EM successfully received by all vehicles}}{\text{number of EM transmitted by all vehicles}} \quad (4.14)$$

4. Taux de livraison (DR : *Delivery Ratio*) : pour évaluer la fiabilité du protocole UV-TDB, DR mesure la proportion de véhicules dans la région d'intérêt qui reçoivent avec succès l'EM [37].

$$\text{DR} = \frac{\text{number of vehicles successfully receiving EM}}{\text{number of vehicles in the RoI}} \quad (4.15)$$

5. Surcharge de diffusion (BO : *Broadcast Overhead*) : cette métrique calcule, pour un EM source diffusé dans le réseau, le rapport entre le nombre total d'EM insérés dans le réseau et le nombre de véhicules ayant reçu le message avec succès. Elle permet de mesurer le coût moyen, en termes de nombre de retransmissions de l'EM, pour informer un seul véhicule.

$$\text{BO} = \frac{\text{number of EM transmitted by all vehicles}}{\text{number of vehicles successfully receiving EM}} \quad (4.16)$$

6. Délai de dissémination (DD : *Dissemination Delay*) : il s'agit du temps moyen mis par un EM pour se rendre du véhicule d'origine à d'autres véhicules dans la région d'intérêt [36]. Dans les applications liées à la sûreté routière, une diffusion efficace des EMs nécessite un délai de dissémination court.

$$\text{DD} = \text{average}(\text{EM reception time} - \text{EM initial time}) \quad (4.17)$$

4.5.3 Résultats de simulation

Dans nos expériences de simulation, nous avons considéré deux scénarios : le scénario de Manhattan et le scénario d'Alger. Outre la différence de topologie des cartes routières, nous vérifions d'abord à quel point le niveau de densité locale de véhicules est similaire dans les deux scénarios. Cela permet de mieux comprendre le comportement des protocoles comparés par rapport aux mesures de performance choisies. Le tableau 4.3 résume les valeurs maximales et moyennes de la densité locale de véhicules (c'est-à-dire la densité de voisinage à un saut perçue par chaque véhicule) observées dans nos expériences de simulation. Chaque valeur représente la moyenne des valeurs mesurées pendant les répliques de la simulation.

Ces premiers résultats soulignent que la densité locale moyenne est plus élevée dans le scénario d'Alger, quelle que soit la densité de véhicules dans le réseau. La différence est de 74,74% à la densité de 500 véh./km², et d'environ 68% aux autres densités de véhicules. La même tendance est observée pour la densité locale maximale

TABLE 4.3 – Densité locale de véhicules

Densité globale de véhicules (#véh./km ²)	Scénario de Manhattan				Scénario d'Alger			
	250	500	750	1000	250	500	750	1000
Maximum de la densité locale de véhicules (#véh.)	67.7	103.3	140.4	167.6	85.4	145.9	187	219.2
Moyenne de la densité locale de véhicules (#véh.)	21.5	39.2	53	65.4	36	68.5	89.4	110.8

avec des variations de 26,14%, 41,24%, 33,19% et 30,79% aux densités de 250, 500, 750 et 1000 véh./km², respectivement. Cette différence dans la densité locale de véhicules n'est pas seulement due aux topologies des cartes routières mais aussi aux types et aux tailles des obstacles affectant la propagation des signaux.

La figure 4.8 montre le taux de collision pour différentes densités de véhicules. Ce rapport reflète le niveau de contention du canal, qui est influencé principalement, en plus de la densité de véhicules, par le nombre de paquets envoyés, c'est-à-dire par l'efficacité du schéma de sélection suivi par chaque protocole. Le protocole HyDiAck utilise un schéma de sélection basé sur le récepteur dans lequel chaque véhicule récepteur d'un EM s'appuie sur ses informations locales pour décider quand retransmettre le message reçu. Par conséquent, le niveau de contention du canal observé est le plus élevé dans le scénario de Manhattan et devient encore plus intense dans le scénario d'Alger en raison de la forte densité locale de véhicules. Dans AddP, le schéma de sélection du prochain relayeur est hybride : le véhicule désigné par l'émetteur n'attend pas avant de retransmettre l'EM. D'autre part, chaque véhicule non désigné recevant l'EM attend suffisamment longtemps pour permettre au véhicule désigné de transmettre le message sans collision. Cela permet au protocole AddP de réduire le taux de collision, par rapport au protocole HyDiAck, en obtenant une amélioration allant jusqu'à 87,52% dans le scénario de Manhattan et jusqu'à 80,3% dans le scénario d'Alger.

Dans notre protocole UV-TDB, en plus du schéma de sélection hybride, tout FC reporte sa retransmission s'il détecte que le canal est occupé, ce qui améliore la suppression de diffusions et conduit à une réduction supplémentaire du taux de collision. À une densité de 1000 véh./km², UV-TDB réduit le taux de collision par rapport au protocole HyDiAck de 88,99% dans le scénario de Manhattan et de 93,54% dans le scénario d'Alger, et par rapport au protocole AddP, il obtient une réduction de 66,04% et 81,2% dans les scénarios de Manhattan et d'Alger, respectivement. Cependant, sous de faibles densités, l'utilisation du mécanisme SCF pour prendre en

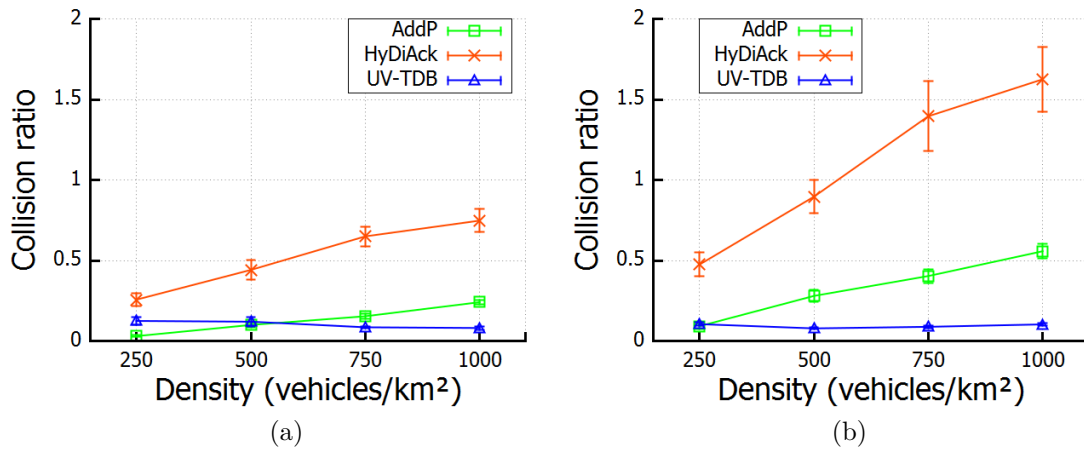


FIGURE 4.8 – Taux de collision. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d’Alger.

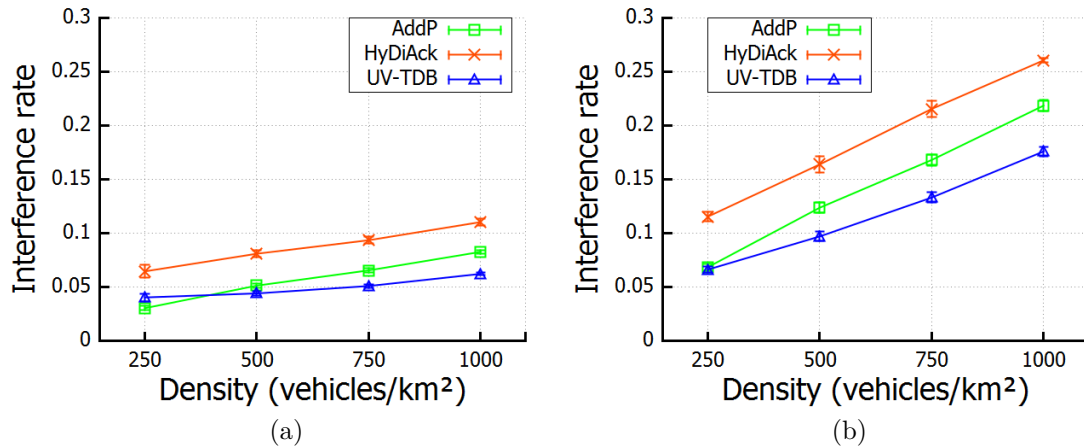


FIGURE 4.9 – Taux d’interférence. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d’Alger.

compte le problème des déconnexions fréquentes augmente le nombre de retransmissions. Par conséquent, le taux de collision de l’UV-TDB est légèrement supérieur à celui obtenu par l’AddP aux densités de 250 et 500 véh./km² dans le scénario de Manhattan et à la densité de 250 véh./km² dans le scénario d’Alger. Enfin, nous pouvons clairement observer que contrairement à HyDiAck et AddP, où la contention des canaux augmente avec la densité de véhicules, UV-TDB maintient le taux de collision stable en dessous de 0,13 paquet perdu pour chaque paquet transmis en moyenne dans les deux scénarios.

La figure 4.9 montre le taux d’interférence pour différentes densités de véhicules. Comme pour le taux de collision, le taux d’interférence est sensible à la densité de véhicules et au nombre de paquets envoyés. Avec une augmentation de la densité de véhicules, les taux d’interférence des trois protocoles augmentent dans les deux scénarios, mais à un taux plus élevé dans le scénario d’Alger en raison de la forte

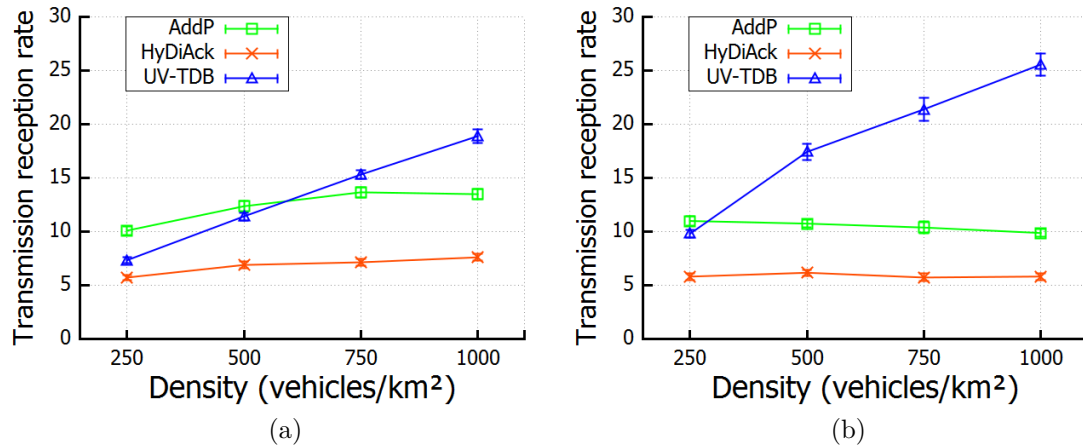


FIGURE 4.10 – Taux de réception des transmissions. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d’Alger.

densité locale de véhicules. Les protocoles HyDiAck et AddP ne disposent pas d’approches dédiées à l’atténuation des interférences. Toutefois, l’efficacité du schéma de sélection du protocole AddP permet de réduire le taux d’interférence, par rapport au protocole HyDiAck, d’environ 0,03 (paquets non décodables en raison de l’interférence pour chaque paquet reçu avec succès) dans le scénario de Manhattan et d’environ 0,04 dans le scénario d’Alger. En revanche, notre protocole UV-TDB utilise le schéma TDB pour atténuer les interférences. Comparé aux protocoles HyDiAck et AddP, UV-TDB atteint le plus faible taux de perte de paquets, dû aux interférences, sauf à la densité de 250 véh./km² dans le scénario de Manhattan. Dans ce cas, le taux d’interférence du protocole UV-TDB reste inférieur à celui de HyDiAck mais légèrement supérieur à celui du protocole AddP. Cela s’explique par le fait qu’à très faible densité de véhicules, UV-TDB utilise davantage de retransmissions pour faire face aux déconnexions fréquentes du réseau. Pour une densité de 1000 véhicules/km², UV-TDB réduit le taux d’interférence par rapport au protocole HyDiAck de 43,48% dans le scénario de Manhattan et de 32,44% dans le scénario d’Alger, et par rapport au protocole AddP de 24,61% et de 19,45% dans les scénarios de Manhattan et d’Alger, respectivement.

La figure 4.10 montre le taux de réception des transmissions pour différentes densités de véhicules. Ce taux ne prend en compte que les EMs et exclut donc les transmissions des BMs. Lorsque la densité de véhicules augmente, la densité locale moyenne de véhicules augmente, et il est logique que le taux de réception moyen par transmission d’un EM augmente également. Cependant, la contention du canal et les interférences augmentent avec la densité de véhicules. Ainsi, notre protocole UV-TDB, qui maintient la stabilité du taux de collision et gère efficacement les in-

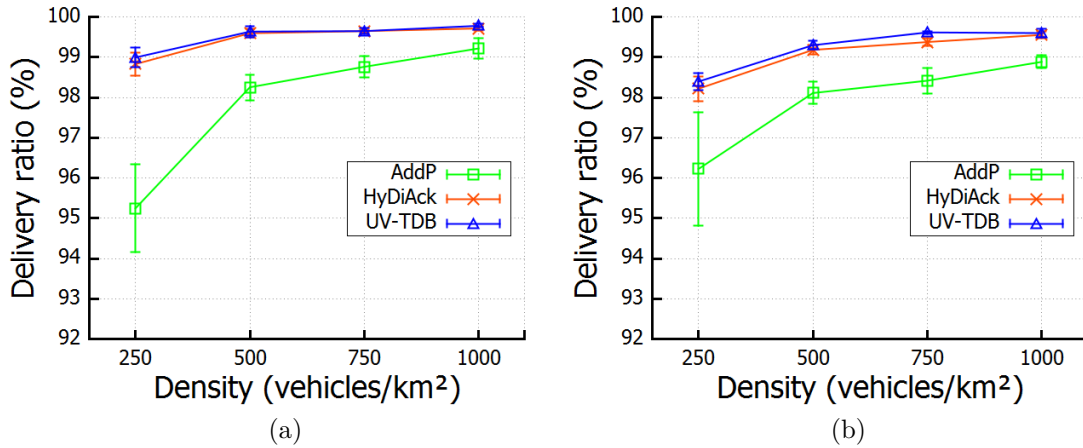


FIGURE 4.11 – Taux de livraison. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d'Alger.

terférences, atteint un taux de réception croissant par transmission en fonction de la densité de véhicules. Ce taux atteint 25,56 réceptions pour chaque transmission dans le scénario d'Alger à la densité maximale de véhicules de l'évaluation. Contrairement au protocole UV-TDB, les taux de réception des transmissions des protocoles HyDiAck et AddP sont presque constants en raison des conflits de canal et des interférences, avec un net avantage pour AddP. Nous pouvons également observer un taux de réception des transmissions plus faible pour UV-TDB que pour AddP aux densités de 250 et 500 véh./km² dans le scénario de Manhattan et à la densité de 250 véh./km² dans le scénario d'Alger. Ceci est dû aux interférences causées par les retransmissions supplémentaires nécessaires pour faire face aux déconnexions fréquentes lorsque la densité de véhicules est faible.

La figure 4.11 montre le taux de livraison pour différentes densités de véhicules. Nous pouvons clairement observer que le protocole AddP a le plus faible taux de livraison. Ce résultat est prévisible, car dans ce protocole, les véhicules ne programment pas de retransmissions pour faire face aux déconnexions du réseau, car cette tâche est déléguée aux RSUs. Même lorsque la densité de véhicules est élevée, les véhicules ne sont pas répartis uniformément sur les routes. Ainsi, des déconnexions intermittentes peuvent toujours se produire, entraînant une mauvaise livraison des paquets. UV-TDB et HyDiAck permettent de gérer les déconnexions fréquentes via le mécanisme SCF. Leurs taux de livraison sont similaires, avec un léger avantage pour notre protocole, et ce malgré le fait que la surcharge de diffusion, en termes de nombre de retransmissions nécessaires pour livrer un EM à un seul véhicule, est très faible par rapport à celui de HyDiAck, comme le montre la figure 4.12. La surcharge de diffusion d'UV-TDB est également faible par rapport à celui d'AddP, sauf aux faibles densités (250 et 500 véh./km² dans le scénario de

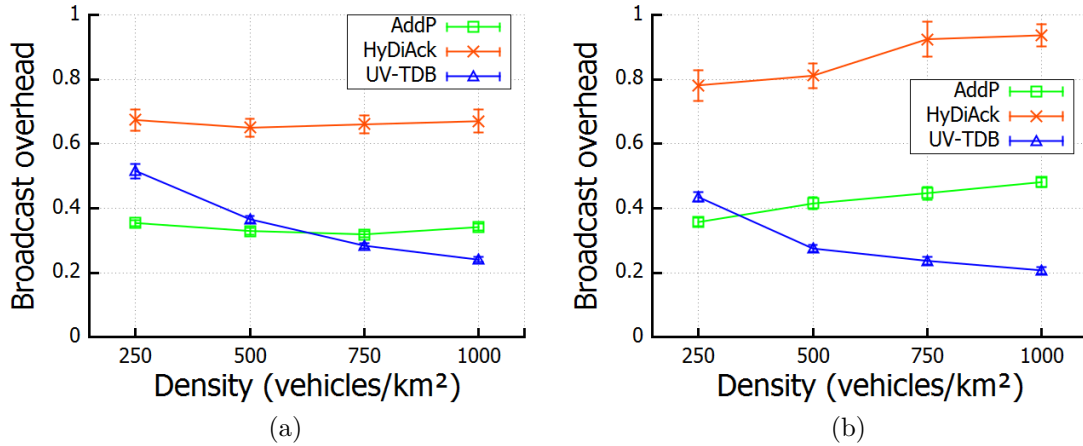


FIGURE 4.12 – Surcharge de diffusion. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d’Alger.

Manhattan et 250 véh./km² dans le scénario d’Alger), car UV-TDB utilise le mécanisme SCF pour prendre en compte le problème des déconnexions fréquentes, ce qui entraîne davantage de retransmissions. Nous pouvons également observer dans notre protocole une tendance à la baisse de la surcharge de diffusion en fonction de la densité de véhicules dans les deux scénarios. En revanche, AddP et HyDiAck génèrent une surcharge de diffusion qui est stable dans le scénario de Manhattan et qui augmente avec la densité de véhicules dans le scénario d’Alger, avec un net avantage pour AddP. Par exemple, à une densité de 1000 véhicules/km² dans le scénario d’Alger, UV-TDB génère une surcharge de diffusion de 0,21 retransmission pour livrer l’EM à un seul véhicule, ce qui représente une réduction de 56,9% et 77,85% par rapport aux protocoles AddP et HyDiAck, respectivement.

En termes de délai de dissémination (figure 4.13), les trois protocoles présentent des performances similaires dans les deux scénarios et pour les différentes densités de véhicules. Cela peut s’expliquer par le fait que le délai de dissémination dépend principalement du nombre de FCs, de leur processus d’attente avant retransmission et de l’effet de la contention du canal et des interférences. Bien que notre protocole exige la retransmission dans des créneaux temporels strictement définis et spécifiques pour chaque zone, ce qui entraîne un temps d’attente supplémentaire par rapport aux autres protocoles, il compense cela par une suppression de diffusions plus efficace, un taux de collision stable et un taux de perte de paquets très faible due aux interférences. Dans AddP et HyDiAck, il n’y a pas de restriction de diffusion basée sur des créneaux horaires spécifiques par région. Cependant, AddP utilise plus de retransmissions mais avec des taux de collision et d’interférence plus élevés. Quant à HyDiAck, il atteint le coût moyen de diffusion le plus élevé, mais aussi les taux de

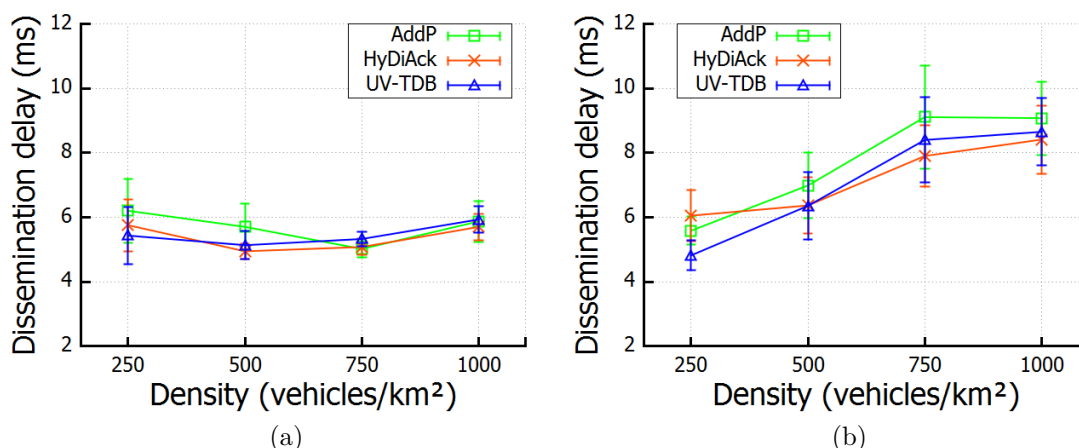


FIGURE 4.13 – Délai de dissémination. (a) Scénario de Manhattan. (b) Scénario d’Alger.

collision et d’interférence les plus élevés.

Enfin, pour mettre en évidence l’évolutivité du protocole que nous proposons, le tableau 4.4 résume les performances de notre protocole UV-TDB par rapport aux protocoles AddP et HyDiAck selon les différentes mesures de performance utilisés dans cette évaluation à la plus forte densité de véhicules simulée (c’est-à-dire 1000 véh./km²).

4.6 Conclusion

Les principales contributions présentées dans ce chapitre peuvent être résumées comme suit :

1. Conception d’un nouveau schéma pour atténuer les interférences des nœuds cachés : étant donné que les nœuds cachés les uns des autres ne peuvent pas détecter leurs activités respectives, leurs transmissions peuvent se chevaucher dans le temps. Cette étude propose un schéma de diffusion basé sur la division temporelle (TDB) pour atténuer ces interférences en organisant les transmissions des relayeurs en fonction des zones dans lesquelles ils se trouvent.
2. Développement d’un protocole de diffusion multi-sauts : sur la base du schéma TDB, nous avons proposé un nouveau protocole de diffusion pour la dissémination de messages d’urgence dans les réseaux urbains de véhicules (UV-TDB). Pour résoudre le problème des tempêtes de diffusion et des déconnexions fréquentes, UV-TDB introduit une nouvelle méthode hybride de sé-

TABLE 4.4 – Performance de notre protocole UV-TDB par rapport aux protocoles AddP et HyDiAck à la plus forte densité de véhicules évaluée.

Mesures de performance	Scénario de Manhattan							Scénario d'Alger						
	CR	IR	TRR	DR	BO	DD	CR	IR	TRR	DR	BO	DD		
Les performances de l'UV-TDB par rapport à l'AddP	-66%	-24.6%	+40%	+0.57%	-29.6%	+1.03%	-81.2%	-19.5%	+158.5%	+0.72%	-56.9%	-4.66%		
Les performances de l'UV-TDB par rapport à l'HyDiAck	-89%	-43.5%	+147.8%	+0.07%	-64.1%	+4.06%	-93.5%	-32.4%	+337.7%	+0.04%	-77.9%	+2.84%		

"+" : se réfère à l'augmentation de la valeur mesurée.

"-" : se réfère à la réduction de la valeur mesurée.

lection des prochains relayers basée sur une décision partagée entre l'émetteur et le récepteur, et met en œuvre le mécanisme Store-Carry-Forward.

3. Effectuer une évaluation rigoureuse des performances via des expériences de simulation : le protocole UV-TDB proposé est évalué par rapport à deux autres protocoles de pointe en utilisant deux cartes routières représentatives, en considérant six mesures de performance et en utilisant un simulateur largement utilisé.

Les résultats de simulation montrent que notre protocole UV-TDB améliore considérablement les performances de la diffusion multi-sauts et surpasse deux protocoles de pointe en termes de réduction de la surcharge de diffusion (jusqu'à 77,9%), du taux de collisions de paquets (jusqu'à 93,5%), du taux d'interférence (jusqu'à 43,5%) et de l'augmentation du taux de réception des messages (jusqu'à 337,7%). Les résultats soulignent également que le protocole UV-TDB s'adapte mieux aux différents niveaux de densité de véhicules, ce qui le rend plus évolutif. Le travail présenté dans ce chapitre a été publié dans la revue scientifique *Vehicular Communications* [18].

Conclusion et perspectives

LE transport intelligent est l'un des principaux piliers des villes intelligentes qui vise à exploiter les données collectées sur le trafic en temps réel pour gérer efficacement le flux de circulation, améliorer la sûreté routière et soutenir la mobilité durable. En combinant les technologies de connectivité et d'automatisation, la technologie émergente des véhicules connectés et autonomes promet de révolutionner le développement du transport intelligent. Les CAVs utilisent diverses technologies sans fil pour communiquer avec les autres véhicules, l'infrastructure et tout le reste, y compris les dispositifs intelligents. Cette combinaison de technologies de communication, utilisée en fonction du contexte d'exploitation et de l'application cible, permet aux CAVs de fonctionner de manière plus sûre et plus intelligente en partageant des informations ou des alertes sur les encombrements et les risques pour la sûreté routière.

Outre l'amélioration de l'efficacité du trafic et la fourniture de services de confort aux usagers, les applications liées à la sûreté routière, qui concernent la vie humaine, restent les applications les plus importantes du transport intelligent. Ces applications sont principalement basées sur des protocoles de distribution ou de partage d'informations entre véhicules. Certaines informations, telles que la densité locale de véhicules, la position, la vitesse, etc., sont partagées avec les véhicules voisins à l'aide des BMs. D'autres informations, telles que les rapports d'urgence et les alertes post-collision, sont transportées dans des messages qui doivent être retransmis pour atteindre le plus grand nombre possible de véhicules dans la région d'intérêt avec des exigences strictes de faible latence et de faible perte de paquets.

En raison de la bande passante limitée disponible pour la communication véhiculaire, la diffusion des EMs nécessite un mécanisme efficace pour supprimer les retransmissions redondantes afin de réduire la congestion du canal tout en assurant une diffusion fiable. Dans ce travail, nous avons proposé uHBS-DP, un nouveau protocole basé sur le délai pour la diffusion des EMs. uHBS-DP est construit sur un nouveau mécanisme de suppression des retransmissions redondantes (uHBS) qui permet aux FCs de prendre la décision de transmettre l'EM ou de supprimer la diffusion en exploitant à la fois la réception en double du même EM et une indication de l'état du canal reçue de la couche inférieure, et donc d'éviter de prendre des décisions hâtives. Les résultats de l'évaluation des performances ont montré que le nouveau

mécanisme de suppression de diffusions permet à l'uHBS-DP de fournir une fiabilité élevée avec une faible surcharge de diffusion par rapport à ses variantes CSBS-var et EMRBS-var. Ces résultats soulignent également que le protocole uHBS-DP surpasse le protocole de pointe AddP en termes de taux de collision, de taux de livraison, de surcharge de diffusion et de délai de dissémination. Dans la perspective de ce travail, nous envisageons d'améliorer encore le mécanisme de suppression proposé en déterminant le temps de report optimal d'une rediffusion en raison de l'occupation du canal afin d'assurer une diffusion plus efficace des messages d'urgence.

Dans ce travail, nous nous sommes également concentrés sur l'atténuation des interférences provenant des nœuds cachés, qui est un problème majeur affectant les communications véhiculaires dans les scénarios de CAVs sous une forte densité de véhicules. Pour surmonter ce problème dans le contexte de la diffusion multi-sauts des EMs dans les environnements urbains, nous avons proposé UV-TDB, un nouveau protocole de diffusion basé sur une nouvelle technique de division temporelle pour les retransmissions. UV-TDB propose une nouvelle méthode hybride de sélection des prochains relayeurs basée sur une décision partagée entre l'émetteur et le récepteur, et utilise le mécanisme Store-Carry-Forward. Cela permet à UV-TDB de s'attaquer efficacement aux problèmes de la tempête de diffusion et des déconnexions fréquentes. Les résultats de la simulation ont montré que UV-TDB améliore considérablement les performances de la diffusion multi-sauts par rapport à deux protocoles bien connus de diffusion en termes de nombre de retransmissions, de taux de collision des paquets et de taux de réception des messages. À notre connaissance, nous sommes les premiers à aborder directement le problème des interférences provenant de n'importe quel relayeur, quel que soit l'émetteur précédent de l'EM reçu. Cela ouvre la voie à la conception d'autres solutions innovantes pour mieux contrôler les collisions de paquets dans des scénarios de forte densité de véhicules et ainsi assurer des performances plus évolutives. Dans le cadre d'un travail futur, il sera intéressant d'explorer comment adapter le schéma TDB pour mieux contrôler la congestion causée par les messages périodiques de sensibilisation.

Bibliographie

- [1] Ghulam ABBAS et al., « PDMAC : A Priority-Based Enhanced TDMA Protocol for Warning Message Dissemination in VANETs », *in : Sensors* 20.1 (2020), DOI : 10.3390/s20010045.
- [2] Hamza Ijaz ABBASI et al., « Towards Fast and Reliable Multihop Routing in VANETs », *in : IEEE Trans. Mobile Comput.* 19.10 (2020), p. 2461-2474, DOI : 10.1109/TMC.2019.2923230.
- [3] Bengi AYGUN, Mate BOBAN et Alexander M. WYGLINSKI, « ECPR : Environment- and context-aware combined power and rate distributed congestion control for vehicular communications », *in : Comput. Commun.* 93 (2016), p. 3-16, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.05.015>.
- [4] Ali BALADOR et al., « Survey on decentralized congestion control methods for vehicular communication », *in : Veh. Commun.* 33 (2022), p. 100394, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100394>.
- [5] Wiem BENRHAIEM, Abdelhakim HAFID et Pratap Kumar SAHU, « Reliable Emergency Message Dissemination Scheme for Urban Vehicular Networks », *in : IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 21.3 (2020), p. 1154-1166, DOI : 10.1109/TITS.2019.2902850.
- [6] Yuanguo BI et al., « A Multi-Hop Broadcast Protocol for Emergency Message Dissemination in Urban Vehicular Ad Hoc Networks », *in : IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 17.3 (2016), p. 736-750, DOI : 10.1109/TITS.2015.2481486.
- [7] Souaad BOUSSOUFA-LAHLAH, Fouzi SEMCHEDINE et Louiza BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, « Geographic routing protocols for Vehicular Ad hoc NETWORKS (VANETs) : A survey », *in : Veh. Commun.* 11 (2018), p. 20-31, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.01.006>.
- [8] Dun CAO et al., « A Relay-Node Selection on Curve Road in Vehicular Networks », *in : IEEE Access* 7 (2019), p. 12714-12728, DOI : 10.1109/ACCESS.2019.2892979.
- [9] Moumena CHAQFEH et Abderrahmane LAKAS, « A novel approach for scalable multi-hop data dissemination in vehicular ad hoc networks », *in : Ad Hoc Networks* 37 (2016), p. 228-239, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.08.021>.

- [10] Moumena CHAQFEH, Hesham EL-SAYED et Abderrahmane LAKAS, « Efficient Data Dissemination for Urban Vehicular Environments », *in : IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 20.4 (2019), p. 1226-1236, DOI : [10.1109/TITS.2018.2850068](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2850068).
- [11] Felipe CUNHA et al., « Data communication in VANETs : Protocols, applications and challenges », *in : Ad Hoc Netw.* 44 (2016), p. 90-103, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.02.017>.
- [12] Soufiene DJAHEL et al., « A Communications-Oriented Perspective on Traffic Management Systems for Smart Cities : Challenges and Innovative Approaches », *in : IEEE Commun. Surveys Tuts.* 17.1 (2015), p. 125-151, DOI : [10.1109/COMST.2014.2339817](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2339817).
- [13] Soufiene DJAHEL et al., « A WAVE Based and Collaboration Driven Framework for Reduced Traffic Congestion in Smart Cities », *in : IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.* 13.4 (2021), p. 251-261, DOI : [10.1109/MITS.2019.2953487](https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2953487).
- [14] David ELLIOTT, Walter KEEN et Lei MIAO, « Recent advances in connected and automated vehicles », *in : J. Traffic Transp. Eng.* 6.2 (2019), p. 109-131, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.005>.
- [15] Elena FASOLO, Andrea ZANELLA et Michele ZORZI, « An Effective Broadcast Scheme for Alert Message Propagation in Vehicular Ad hoc Networks », *in : Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, t. 9, 2006, p. 3960-3965, DOI : [10.1109/ICC.2006.255700](https://doi.org/10.1109/ICC.2006.255700).
- [16] Julian GARBISO et al., « Fair Self-Adaptive Clustering for Hybrid Cellular-Vehicular Networks », *in : IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 22.2 (2021), p. 1225-1236, DOI : [10.1109/TITS.2020.2966279](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2966279).
- [17] Salah GUESMIA, Soufiene DJAHEL et Fouzi SEMCHEDINE, « A new delay-based broadcast suppression mechanism for efficient emergency messages dissemination in CAVs environment », *in : Ad Hoc Netw.* (2023), p. 103242, ISSN : 1570-8705, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103242>.
- [18] Salah GUESMIA, Fouzi SEMCHEDINE et Soufiene DJAHEL, « A scalable time-division-based emergency messages broadcast scheme for connected and autonomous vehicles in urban environment », *in : Veh. Commun.* 38 (2022), p. 100544, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100544>.

- [19] Elyes Ben HAMIDA, Hassan NOURA et Wassim ZNAIDI, « Security of Cooperative Intelligent Transport Systems : Standards, Threats Analysis and Cryptographic Countermeasures », *in : Electronics* 4.3 (2015), p. 380-423, DOI : 10.3390/electronics4030380.
- [20] Nehad Hameed HUSSEIN et al., « A Comprehensive Survey on Vehicular Networking : Communications, Applications, Challenges, and Upcoming Research Directions », *in : IEEE Access* 10 (2022), p. 86127-86180, DOI : 10.1109/ACCESS.2022.3198656.
- [21] « IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture », *in : IEEE Std 1609.0-2019* (2019), p. 1-106, DOI : 10.1109/IEEESTD.2019.8686445.
- [22] « IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6 : Wireless Access in Vehicular Environments », *in : IEEE Std 802.11p-2010* (2010), p. 1-51, DOI : 10.1109/IEEESTD.2010.5514475.
- [23] « IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks– Specific Requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications », *in : IEEE Std 802.11-2012* (2012), DOI : 10.1109/IEEESTD.2012.6178212.
- [24] « Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band », *in : ETSI EN 302 663 V1.2.1 (2013-05)* (2013).
- [25] « Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4 : Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1 : Media-Independent Functionality », *in : ETSI EN 302 636-4-1 V1.4.1* (2020).
- [26] Amirhosein KARBASI et Steve O’HERN, « Investigating the Impact of Connected and Automated Vehicles on Signalized and Unsignalized Intersections Safety in Mixed Traffic », *in : Future Transp.* 2.1 (2022), p. 24-40, DOI : 10.3390/futuretransp2010002.
- [27] Bernhard KLOIBER, Jérôme HÄRRI et Thomas STRANG, « Dice the TX power — Improving Awareness Quality in VANETs by random transmit power selection », *in : Proc. IEEE Veh. Netw. Conf. (VNC)*, 2012, p. 56-63, DOI : 10.1109/VNC.2012.6407445.

- [28] Gökhan KORKMAZ et al., « Urban Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicle Communication Systems », *in : Proc. 1st ACM Int. Workshop Veh. Ad Hoc Netw.* Philadelphia, PA, USA, 2004, p. 76-85, ISBN : 1581139225, DOI : 10.1145/1023875.1023887.
- [29] Daniel KRAJZEWICZ, « Traffic simulation with SUMO—simulation of urban mobility », *in : Fundam. Traffic Simul.* Springer, 2010, p. 269-293, DOI : 10.1007/978-1-4419-6142-6.
- [30] Shahid LATIF et al., « A comparative study of scenario-driven multi-hop broadcast protocols for VANETs », *in : Veh. Commun.* 12 (2018), p. 88-109, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.01.009>.
- [31] Shahid LATIF et al., « A comparative study of scenario-driven multi-hop broadcast protocols for VANETs », *in : Vehicular Communications* 12 (2018), p. 88-109, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.01.009>.
- [32] Gui-Sen LI, Wan-Liang WANG et Xin-Wei YAO, « An adaptive and opportunistic broadcast protocol for vehicular ad hoc networks », *in : Int. J. Autom. Comput.* 9.4 (2012), p. 378-387, DOI : 10.1007/s11633-012-0658-9.
- [33] Pu LI et al., « A Probabilistic Broadcasting Scheme for Emergent Message Dissemination in Urban Internet of Vehicles », *in : IEEE Access* 9 (2021), p. 113187-113198, DOI : 10.1109/ACCESS.2021.3103843.
- [34] Feng LYU et al., « Characterizing Urban Vehicle-to-Vehicle Communications for Reliable Safety Applications », *in : IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 21.6 (2020), p. 2586-2602, DOI : 10.1109/TITS.2019.2920813.
- [35] Guilherme MAIA et al., « Data dissemination in urban Vehicular Ad hoc Networks with diverse traffic conditions », *in : Proc. IEEE Symp. Comput. Commun. (ISCC)*, 2013, p. 000459-000464, DOI : 10.1109/ISCC.2013.6754989.
- [36] René OLIVEIRA et al., « Reliable data dissemination protocol for VANET traffic safety applications », *in : Ad Hoc Netw.* 63 (2017), p. 30-44, DOI : 10.1016/j.adhoc.2017.05.002.
- [37] Sooksan PANICHPAPIBOON et Wasan PATTARA-ATIKOM, « A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks », *in : IEEE Commun. Surveys Tuts.* 14.3 (2012), p. 784-798, DOI : 10.1109/SURV.2011.070711.00131.
- [38] Jagruti SAHOO et al., « Binary-Partition-Assisted MAC-Layer Broadcast for Emergency Message Dissemination in VANETs », *in : IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 12.3 (2011), p. 757-770, DOI : 10.1109/TITS.2011.2159003.

- [39] Syed Sarmad SHAH et al., « Time Barrier-Based Emergency Message Dissemination in Vehicular Ad-hoc Networks », *in : IEEE Access* 7 (2019), p. 16494-16503, DOI : 10.1109/ACCESS.2019.2895114.
- [40] Steven E. SHLADOVER, « Connected and automated vehicle systems : Introduction and overview », *in : J. Intell. Transp. Syst.* 22.3 (2018), p. 190-200, DOI : 10.1080/15472450.2017.1336053.
- [41] Christoph SOMMER et al., « How Shadowing Hurts Vehicular Communications and How Dynamic Beaconing Can Help », *in : IEEE Trans. Mobile Comput.* 14.7 (2015), p. 1411-1421, DOI : 10.1109/TMC.2014.2362752.
- [42] Christoph SOMMER, David ECKHOFF et Falko DRESSLER, « IVC in Cities : Signal Attenuation by Buildings and How Parked Cars Can Improve the Situation », *in : IEEE Trans. Mobile Comput.* 13.8 (2014), p. 1733-1745, DOI : 10.1109/TMC.2013.80.
- [43] Christoph SOMMER, Reinhard GERMAN et Falko DRESSLER, « Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis », *in : IEEE Trans. Mobile Comput.* 10.1 (2011), p. 3-15, DOI : 10.1109/TMC.2010.133.
- [44] Sami ULLAH et al., « RBO-EM : Reduced Broadcast Overhead Scheme for Emergency Message Dissemination in VANETs », *in : IEEE Access* 8 (2020), p. 175205-175219, DOI : 10.1109/ACCESS.2020.3025212.
- [45] András VARGA et Rudolf HORNIG, « An overview of the OMNeT++ simulation environment », *in : Proc. 1st Int. Conf. Simul. Tools Techn. Commun., Netw. Syst. workshops*, Simutools '08, Marseille, France, 2008, ISBN : 9789639799202.
- [46] Wantanee VIRIYASITAVAT, Ozan K. TONGUZ et Fan BAI, « UV-CAST : an urban vehicular broadcast protocol », *in : IEEE Commun. Mag.* 49.11 (2011), p. 116-124, DOI : 10.1109/MCOM.2011.6069718.
- [47] Hongseok YOO et Dongkyun KIM, « ROFF : RObust and Fast Forwarding in Vehicular Ad-Hoc Networks », *in : IEEE Trans. Mobile Comput.* 14.7 (2015), p. 1490-1502, DOI : 10.1109/TMC.2014.2359664.
- [48] Sofiane ZEMOURI, Soufiene DJAHEL et John MURPHY, « A fast, reliable and lightweight distributed dissemination protocol for safety messages in Urban Vehicular Networks », *in : Ad Hoc Netw.* 27 (2015), p. 26-43, DOI : 10.1016/j.adhoc.2014.11.016.

- [49] Sofiane ZEMOURI, Soufiene DJAHEL et John MURPHY, « An Altruistic Prediction-Based Congestion Control for Strict Beaconing Requirements in Urban VANETs », *in : IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst.* 49.12 (2019), p. 2582-2597, DOI : 10.1109/TSMC.2017.2759341.
- [50] Sofiane ZEMOURI, Soufiene DJAHEL et John MURPHY, « Smart adaptation of beacons transmission rate and power for enhanced vehicular awareness in VANETs », *in : Proc. IEEE 17th Int. Conf. Intell. Transp. Syst. (ITSC)*, 2014, p. 739-746, DOI : 10.1109/ITSC.2014.6957777.
- [51] Xuming ZENG, Ming YU et Dianhong WANG, « A New Probabilistic Multi-Hop Broadcast Protocol for Vehicular Networks », *in : IEEE Trans. Veh. Technol.* 67.12 (2018), p. 12165-12176, DOI : 10.1109/TVT.2018.2872998.
- [52] Hui ZHANG et Xinming ZHANG, « An Adaptive Control Structure Based Fast Broadcast Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks », *in : IEEE Commun. Lett.* 21.8 (2017), p. 1835-1838, DOI : 10.1109/LCOMM.2017.2699173.
- [53] Xin Ming ZHANG et al., « A Concurrent Transmission Based Broadcast Scheme for Urban VANETs », *in : IEEE Trans. Mobile Comput.* 18.1 (2019), p. 1-12, DOI : 10.1109/TMC.2018.2827930.
- [54] Xin Ming ZHANG et al., « Fast, Efficient Broadcast Schemes Based on the Prediction of Dynamics in Vehicular Ad Hoc Networks », *in : IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 21.2 (2020), p. 531-542, DOI : 10.1109/TITS.2019.2896627.