



HAL
open science

Techniques de transmission et d'accès sans fil dans les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANETS)

Abdel-Mehsen Ahmad

► **To cite this version:**

Abdel-Mehsen Ahmad. Techniques de transmission et d'accès sans fil dans les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANETS). Architecture, aménagement de l'espace. Institut National des Télécommunications; Université Libanaise, 2012. Français. NNT : 2012TELE0036 . tel-00762633

HAL Id: tel-00762633

<https://theses.hal.science/tel-00762633>

Submitted on 7 Dec 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THESE DE DOCTORAT CONJOINT TELECOM SUDPARIS et L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE
EN CO-TUTELLE AVEC L'UNIVERSITE LIBANAISE**

Spécialité : Informatique et Télécommunications

Ecole doctorale : Informatique, Télécommunications et Electronique de Paris

Présentée par

Abdel Mehzen AHMAD

**Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE TELECOM SUDPARIS, PARIS VI, UNIVERSITE LIBANAISE**

**TECHNIQUES DE TRANSMISSION ET D'ACCES SANS FILS DANS LES RESEAUX
AD HOC VEHICULAIRES (VANETS)**

Soutenue le 09 Octobre 2012 devant le jury composé de :

M. Guy Pujolle	Professeur à Paris VI	Président
M. André-Luc Beylot	Professeur à l'ENSEEIH	Rapporteur
M. Jalel Ben Othman	Professeur à Paris XIII	Rapporteur
M. Abdullatif Samhat	Professeur à l'Université Libanaise	Invité
M. Abbass Ibrahim	Professeur au CNAM	Invité
M. Mahmoud Doughan	Maître de conférences à l'Université Libanaise	Co-directeur de thèse
M. Imad Mougharbel	Professeur à l'Université Libanaise	Directeur de thèse
M. Michel Marot	Professeur à l'Institut Mines-Télécom	Directeur de thèse

Thèse n° 2012TELE0036

A mes parents

A ma famille

A Hiba

Remerciements

Il m'est agréable d'adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté, de près ou de loin, aide et conseils lors de l'élaboration de cette thèse de doctorat.

Je voudrais tout d'abord remercier les responsables du programme de bourses d'Excellence Eiffel pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant ma candidature à cette bourse. Sans elle l'achèvement de ce travail aurait été très difficile. Je remercie en particulier Madame Mady MOREAU pour son soutien administratif durant la dernière année de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma plus vive reconnaissance et mes remerciements sincères à mon Directeur de thèse en France, Monsieur le Professeur Michel MAROT (Prof. à l'Institut Mines-Télécom), sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Je le remercie très sincèrement pour sa disponibilité et le partage de ses nombreuses connaissances lors de nos nombreuses discussions, et pour la confiance qu'il me témoigne. Enfin, je tiens à le remercier pour ses qualités humaines d'écoute, et sa critique pleine d'aménité et d'intelligence.

Je souhaite adresser mes plus vifs remerciements à Monsieur le Professeur Imad MOUGHARBEL (Prof. à l'Université Libanaise), mon Directeur de thèse au Liban, pour ses conseils judicieux et son enthousiasme quotidien tout au long de cette étude. Je le remercie pour son soutien moral pendant les moments difficiles.

Je tiens à remercier spécialement les Professeurs André-Luc BEYLOT et Jalel Ben Othman de l'intérêt qu'ils ont porté à l'égard de cette recherche en s'engageant à en être les rapporteurs. Je les remercie de l'honneur qu'ils me font en siégeant à ce jury.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Monsieur le Professeur Mahmoud DOUGAN pour son encadrement de cette thèse. Je le remercie pour ses conseils précieux, sa grande disponibilité et ses multiples encouragements.

Je remercie également Monsieur le Professeur Vincent GAUTHIER pour les nombreux conseils qu'il m'a apportés et son apport scientifique pour cette recherche.

Enfin, je remercie les membres du jury pour l'attention qu'ils ont accordé à cette dissertation originale et d'avoir bien voulu participer au jury. Je remercie particulièrement Monsieur le Professeur Guy Pujolle qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je remercie Monsieur le Professeur Hervé Debar de m'avoir accueilli dans son département Réseaux et Services de Télécommunications à Télécom SudParis.

Mes remerciements s'adressent également à Madame Céline BOURDAIS, Madame Françoise ABAD, et Madame Xayplathi LYFOUNG pour leurs accueils chaleureux et leurs aides administratifs au cours de mon parcours académique à Télécom SudParis.

Je remercie, par ailleurs, l'ensemble de mes collègues et amis, en particulier Nabil et Charbel, qui ont m'apporté leur soutien moral tout au long de ces années.

C'est enfin à ma famille que vont mes remerciements : à ma mère et mon père tout d'abord qui m'ont soutenu sans faille tout au long de ces années, ensuite à mes sœurs et mes frères, et enfin à Hiba sur qui je me repose tant pour la bonne marche de ma vie. C'est d'abord et avant tout grâce à eux que ce travail a pu être mené à son terme. Ce travail leur est légitimement dédié.

Résumé

Les réseaux véhiculaires font l'objet de recherches actives aussi bien dans le domaine des réseaux que dans celui des transports. Le potentiel des réseaux véhiculaires à fournir des services comme l'information sur le trafic en temps réel ou sur les accidents font de cette technologie un domaine de recherche très important. Ces réseaux peuvent comporter des communications véhicule-à-véhicule (V2V), véhicule-à-infrastructure (V2I), ou une combinaison des deux.

La norme IEEE 1609.4 est la spécification multicanal pour l'IEEE802.11p/WAVE des réseaux véhiculaires (VANETs). Elle utilise sept canaux, l'un étant un canal de contrôle (CCH) qui est écouté par les équipements de façon périodique, et les six autres canaux sont utilisés comme canaux de service (SCH). Elle définit également une division du temps en alternance entre les intervalles CCH et les intervalles SCH.

L'objet de cette thèse de doctorat est d'évaluer les performances des réseaux VANETs dans le cas des communications véhiculaires sans infrastructure, et au niveau des couches inférieures du standard 802.11p.

Dans la première partie, nous proposons une approche MAC d'allocation multicanal opportuniste dans un contexte sans infrastructure. Cette approche est conforme à la norme IEEE1609.4 -2010 de l'architecture WAVE pour un fonctionnement multicanal, et elle est conçue pour des applications de services de données (non urgentes), tout en assurant la transmission des messages de sécurité routière et des paquets de contrôle. Pour maintenir la qualité de service des deux types de messages (urgents et non-urgents) en exploitant la capacité du canal, deux solutions sont proposées.

Dans la deuxième partie, lorsque le véhicule sélectionne son canal et contrôle son alternance temporelle entre CCH et SCH, il commence à transmettre ses paquets, en particulier sur le canal CCH, lesquels ont une durée de péremption. Nous présentons une approche visant à minimiser les collisions des émetteurs tout en évitant la contention de début d'intervalle, en particulier dans un contexte de densité élevée de véhicules.

Même si les mécanismes proposés ci-dessus diminuent le taux de collision, il n'est pas possible de les supprimer complètement. Dans la troisième partie, nous traitons le problème des collisions entre les paquets diffusés sur le CCH, en particulier quand la charge des messages transmis dépasse la capacité du canal. Pour cela, nous proposons un nouveau mécanisme de codage réseau analogique adapté à la modulation QPSK pour les messages diffusés sur le CCH. Dans cette approche des symboles connus sont envoyés avant d'envoyer les paquets pour estimer les

paramètres du canal et une solution explicite est utilisée pour inverser le système de la superposition de deux paquets.

Abstract

Vehicular networks are the subject of active research in the field of networks as well as transport. The potential for vehicular networks to provide services such as traffic information in real time or accident makes this technology a very important research domain. These networks may support vehicle-to-vehicle communications (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I), or a combination of both.

The IEEE 1609.4 is the specification of multichannel operations for IEEE802 .11p/WAVE vehicular networks (VANETs). It uses seven channels; one being a control channel (CCH) which is listened periodically by the vehicles and the other six channels are used as service channels (SCH). It also defines a time division between alternating CCH and SCH intervals.

The purpose of this thesis is to evaluate the performance of VANETs in the case of vehicular communications without infrastructure, and at the lower layers of IEEE 802.11p standard.

In the first part, we propose an opportunistic multichannel MAC allocation in an environment without infrastructure. This approach is consistent with the standard IEEE1609.4 -2010/WAVE for a multi-channel operation, and it is designed for data services applications (non-urgent), while ensuring the transmission of road safety messages and control packets. To maintain the quality of service of the two types of messages (urgent and non-urgent) by exploiting the channel capacity, two solutions are proposed.

In the second part, when the vehicle selects its channel and controls its temporal alternation between CCH and SCH, it starts transmitting its packets, particularly on the CCH, which have an expiration time. We present an approach to minimize collisions between transmitters while avoiding contention at the beginning of CCH interval, especially in a context of high vehicular density.

Although the mechanisms proposed above reduce the collision rate, it is not possible to completely remove these collisions. In the third part, we address the problem of collisions between broadcast packets on the CCH, especially when the load of transmitted messages exceeds the channel capacity. For this purpose, we propose a new analog network coding mechanism adapted to QPSK modulation for broadcast messages on the CCH. In this approach, known symbols are sent before sending the packets to estimate the channel parameters and an explicit solution is used to reverse the system of the superposition of two packets.

Table des Matières

Remerciements.....	iii
Résumé.....	v
Abstract.....	vii
Table des Matières.....	viii
Table des figures.....	xiii
Liste des Tableaux.....	xvi
Table des acronymes.....	xvii
Chapitre I. Introduction.....	20
I.1 Pourquoi les réseaux véhiculaires ?.....	21
I.2 Couche MAC: Difficultés et Exigences.....	23
I.3 Plan de la thèse et contributions.....	24
I.4 Problématiques.....	26
I.4.1 Première problématique : Allocation de ressources.....	26
I.4.2 Deuxième problématique : Diffusion des paquets sur le canal de contrôle d'IEEE1609.4.....	27
I.4.3 Troisième problématique : Codage Réseau Analogique pour la diffusion des paquets sur CCH.....	28
Chapitre II. Etat de l'art des réseaux véhiculaires.....	31
II.1 Introduction aux réseaux véhiculaires.....	31
II.2 Développement des Standards pour les réseaux véhiculaires.....	31
II.2.1 Amérique du Nord.....	31
II.2.1.1 American Society for Testing and Materials International (ASTM).....	32
II.2.1.2 IEEE 802.11p.....	32
II.2.1.3 IEEE 1609.....	33
o SAE J2735.....	33
II.2.2 Europe.....	33

II.2.2.1	Institut Européen des Normes de Télécommunications (ETSI).....	34
o	CAR-2-CAR Communication Consortium.....	35
II.3	Méthodes d'accès sans fils dans les réseaux véhiculaires.....	35
II.3.1	DSRC/WAVE.....	35
II.4	Scénarios possibles des réseaux véhiculaires.....	36
II.5	Caractéristiques des environnements VANET.....	37
II.6	Applications de sécurité routière dans les réseaux véhiculaires.....	38
II.6.1	Introduction.....	38
II.6.2	Nature des communications.....	39
II.6.3	Types de messages.....	39
II.6.3.1	Messages périodiques.....	39
II.6.3.2	Les messages événementiels (Event-Driven Messages).....	40
II.6.4	Diffusion de message (<i>Message Broadcast</i>).....	40
II.6.5	Applications de sécurité routière.....	40
II.7	Applications VANET basées sur la position géographique.....	41
II.7.1	Communication des véhicules.....	42
II.7.2	Assistance à la conduite.....	42
II.7.3	Conduite coopérative.....	44
II.8	Techniques de localisation dans VANETs.....	44
II.8.1	Système de positionnement global -GPS/DGPS.....	45
II.8.2	Localisation par la carte géographique.....	47
II.8.3	Navigation à l'estime.....	47
II.9	Trafic routier.....	48
o	Modèles macroscopiques.....	48
o	Modèles mésoscopiques.....	49
o	Modèles microscopiques.....	49
II.10	Simulateurs des réseaux véhiculaires.....	50

II.10.1	Types des simulateurs.....	50
II.10.1.1	Simulateurs de mobilité.....	51
II.10.1.2	Simulateurs réseaux.....	51
II.10.1.3	Simulateurs fortement intégrés.....	51
o	NCTUns – EstiNet.....	52
II.11	Couche physique du DSRC.....	54
II.11.1	Architecture de la couche physique.....	54
II.11.2	Technologies de la couche Physique.....	55
II.11.3	Spectre DSRC.....	56
II.11.4	Résumé	58
II.12	Couche de liaison de données du DSRC (<i>Data Link Layer</i>).....	59
II.12.1	Sous-couche de Contrôle d'accès au support (MAC).....	59
II.12.1.1	Règles basées sur la session.....	59
II.12.1.2	Règles d'accès au support.....	63
II.12.1.3	Format de la trame MAC 802.11	63
II.12.2	Sous-couche de contrôle de la liaison logique (LLC)	64
II.13	Couches DSRC moyennes (<i>Middle Layers</i>).....	65
II.13.1	IEEE 1609.4: Extension MAC pour des opérations multicanaux.....	66
II.13.1.1	Le passage du CCH à un SCH.....	67
II.13.1.2	Problèmes de collisions des trames.....	68
o	Collisions synchronisées des trames	68
o	Les collisions des trames liées à la congestion (Congestion-related)	69
II.14	Conclusion.....	70
Chapitre III.	Allocation de ressources dans l'IEEE 802.11p/1609.4.....	72
III.1	Rappel.....	72
III.1.1.1	Commutation sur un SCH.....	73
III.1.2	Problématiques.....	74

III.2	Etudes antérieures.....	76
III.3	Modèle du système.....	79
III.3.1	Sélection du canal de service.....	79
III.3.1.1	Motivation.....	79
III.3.2	Notre proposition: Mécanisme d'accès à canaux multiples opportuniste (Hybrid Multichannel Selection).....	81
III.3.3	Accès aux canaux de service.....	84
III.3.3.1	Accès immédiat au SCH basé sur l'écoute du canal (Listening-based Immediate SCH Access -LISA).....	84
III.3.3.2	Chaîne de transmission périodique.....	86
III.4	Evaluation de performances.....	89
III.4.1	Mécanisme d'accès à canaux multiples opportuniste.....	90
III.4.2	Accès immédiat au SCH basé sur l'écoute du canal (Listening-based Immediate SCH Access -LISA).....	92
III.4.3	Chaîne de transmission périodique.....	96
III.5	Conclusion.....	99
Chapitre IV.	Diffusion des paquets sur le canal de contrôle dans l'IEEE 1609.4	102
IV.1	Introduction.....	102
IV.2	Travaux antérieurs.....	103
IV.3	Mécanisme proposé: Schéma de Dispersion et d'Ecoute pour la diffusion dans les réseaux véhiculaires.....	105
IV.3.1	Approche avec le back-off standard.....	105
IV.3.2	Approche avec une nouvelle technique de back-off.....	106
IV.3.3	Le calendrier des dispersions.....	107
IV.3.4	Erreurs GPS.....	108
IV.3.4.1	Covariance et Corrélation.....	108
o	Propriétés de la matrice de covariance Σ	109
IV.3.4.2	Génération des variables aléatoires normales corrélées.....	109

○ Décomposition de Cholesky d'une matrice symétrique définie positive.....	109
IV.3.4.3 Génération des vecteurs d'erreur GPS (E_i).....	110
IV.4 Evaluation de performances.....	111
IV.5 Conclusion.....	116
Chapitre V. Codage réseaux.....	117
V.1 Introduction au Codage Réseaux.....	118
V.2 Description du mécanisme de Codage Réseau Analogique.....	119
V.3 Algorithme de décodage ZigZag.....	123
V.4 Etudes antérieures.....	125
V.5 Le mécanisme proposé : BANC.....	127
V.5.1 BANC : Le scénario.....	127
V.5.2 BANC : Le modèle.....	127
V.5.3 Estimation de l'amplitude.....	128
V.5.4 Estimation de la phase.....	129
V.5.4.1 Au niveau émetteur.....	129
V.5.4.2 Au niveau récepteur.....	129
V.5.4.3 Résolution des équations.....	131
○ Solutions possibles.....	131
V.5.4.4 Construction des fonctions de codage/décodage.....	133
V.5.4.5 Décodage de la séquence d'origine de bits.....	134
V.6 Evaluation des performances.....	134
V.7 Conclusion.....	138
Chapitre VI. Conclusions et perspectives.....	140
Bibliographie.....	145

Table des figures

Figure 2.1 : Scénarios possibles pour la connexion entre les véhicules : (a) DSRC/WiFi; (b) Cellulaire/ WiMax; (c) DSRC/WiFi et Cellulaire/WiMax.....	37
Figure 2.2 : Répartition des Messages (<i>Message Dispatcher</i>).....	40
Figure 2.3: Quelques applications VANET basées sur la localisation.....	42
Figure 2.4: Techniques de localisation dans VANET.....	45
Figure 2.5: Exemples des techniques de localisation appliquées dans VANET.....	46
Figure 2.6: Désignations du plan des canaux DSRC en US [HL10].....	56
Figure 2.7: Communications entre les véhicules avec et sans infrastructure.....	60
Figure 2.8: Format de la trame 802.11.....	64
Figure 2.9: Format de la trame 802.2 LLC utilisée en DSRC.....	64
Figure 2.10: Architecture des couches du DSRC en US (IETF RFC 768).....	65
Figure 2.11: Division de temps entre CCH et SCH [HL10].....	67
Figure 3.1: Division du temps selon l'IEEE1609.4: sync, de garde, CCH et SCH (cf. [IE410])	73
Figure 3.2 : Quelques exemples de sources de paquets non reçus.....	81
Figure 3.3: Allocation du canal basée sur la date et la position géographique.....	82
Figure 3.4: Les différentes zones de couverture et sensible.....	83
Figure 3.5: Exemple de Table d'allocation et de Liste d'états des canaux.....	83
Figure 3.6: Modes d'accès au canal: (a) continu, (b) alternatif, (c) immédiat, and (d) étendu [IE410].....	84
Figure 3.7 Schéma proposé (LISA): Intervalle sync avec deux périodes d'écoute (TLS).....	85
Figure 3.8 Mécanisme de « Transmission en Chaine ».....	87
Figure 3.9: Taux d'occupation du canal.....	91
Figure 3.10 Répartition du taux d'occupation entre les 6 canaux SCH.....	91
Figure 3.11 : Taux d'accès au canal en utilisant la liste d'états des canaux.....	92
Figure 3.12 : Gain d'utilisation du SCH avec le TLS, en fonction de la position du TLS.....	93
Figure 3.13 : Sélection de la position du TLS.....	93
Figure 3.14 : Performance en termes d'utilisation du SCH.....	94
Figure 3.15 : Taux de réception des paquets urgents (de fréquence 10Hz) en fonction du trafic de données arrivé.....	95
Figure 3.16 : Taux de réception des paquets urgents en fonction de la fréquence de génération des paquets urgents.....	96

Figure 3.17 : Taux de réception des paquets non-urgents dans le SCH en fonction de la fréquence de génération des paquets urgents.....	96
Figure 3.18 : Temps moyen pris sur le CCH pour transmettre sur le SCH.....	97
Figure 3.19 : Amélioration du débit SCH en utilisant 2 et 3 sauts (3 et 4 véhicules par chaînes).....	98
Figure 3.20 : Variation du gain d'utilisation du SCH suite à une variation statique du trafic de sécurité routière.....	99
Figure 3.21 Taux de réception des paquets urgents en fonction du nombre des nœuds.....	99
Figure 4.1: Les véhicules sont « dispersés » d'une manière aléatoire dans le temps en utilisant un calendrier.....	105
Figure 4.2: Procédures de backoff: standard et celle proposée.	107
Figure 4.3: Calendrier des dispersions: un exemple d'association aléatoire des dates de transmissions avec les secteurs géographiques.....	108
Figure 4.4: Les 15 secteurs voisins dans une route à 3 voies. Les zones pointillées représentent les possibilités des secteurs calculés au lieu du secteur (0,0).....	111
Figure 4.5: Trois vecteurs corrélés.....	113
Figure 4.6: Taux de coïncidence en fonction du nombre des véhicules	114
Figure 4.7: Probabilité de perte des paquets pour différentes valeurs de CW et nombres des nœuds	115
Figure 4.8: Taux de réception des paquets en fonction du nombre des nœuds.	115
Figure 5.1 : Topologie Alice-Bob. Les lignes pointillées représentent les couvertures radio...	120
Figure 5.2: Approche traditionnelle pour une topologie Alice-Bob.....	120
Figure 5.3: Codage réseaux numérique pour une topologie Alice-Bob.....	120
Figure 5.4: Codage réseaux analogique pour une topologie Alice-Bob.....	120
Figure 5.5: Topologie en chaîne.....	121
Figure 5.6: Approche traditionnelle pour une topologie en chaîne.....	121
Figure 5.7: Codage Réseaux Analogique pour une topologie en chaîne.....	121
Figure 5.8: Topologie en « X ». Deux flux croisant par un nœud R.....	121
Figure 5.9: Décodage ZigZag.....	124
Figure 5.10: Application de ZigZag dans différents modèles de collision.....	125
Figure 5.11: Application de ZigZag pour trois collisions.....	125
Figure 5.12: Scénario d'application du BANC.....	127
Figure 5.13: Forme du paquet envoyé.....	129
Figure 5.14: Différentes positions des paquets interférés.....	130

Figure 5.15 : Taux d'occurrence vs. Nombre des signaux interférés au même moment. L'intervalle de confiance est donné pour une moyenne de 50 densités de véhicules,.....	137
Figure 5.16: Probabilité de réception vs. Nombre de nœuds.....	137
Figure 5.17: Taux des paquets perdues et gagnés par BANC par rapport au standard.....	138
Figure 5.18: Taux d'amélioration de la capacité du CCH.....	138

Liste des Tableaux

Table 2.I. Une comparaison de quelques simulateurs VANET.....	53
Table 2.II Options des débits de données dans un canal DSRC 10 MHz OFDM.....	57
Table 2.III Spécifications du standard IEEE 802.11.....	57
Table 3.I. Le rôle des différents membres de la chaîne de transmission.....	88
Table 4.I. Exemple des secteurs interférant avec le secteur N°0.....	112
Table 4.II. Paramètres de simulation.....	113
Table 5.I. Fonction de mise en correspondance entre phases successives.....	133
Table 5.II. Paramètres de simulation.....	135

Table des acronymes

ADAS	Advanced Driver Assistant Systems
AHS	Automated Highway System
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANC	Analog Network Coding
AT	Allocation Table
BSS	Base Stations Set
C2C	Car-to-Car
CALM	Communications Access for Land Mobiles
CCH	Control Channel
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance
CW	Contention Window
DS	Distributed System
DSRC	Dedicated Short Range Communications
ETC	Electronic Toll Collection
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FCS	Frame Check Sequence
GPS	Global Positioning System
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transport System
IVI	Intelligent Vehicle Initiative
LLC	Logical Link Control
LOS/NLOS	Line of Sight/ Non-LOS

MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad hoc Network
MPDU	MAC Protocol Data Unit
NAV	Network Allocation Vector
OBU	On-board Unit
OCB	Outside the Context
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
P2P	Peer-to-Peer
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical Layer
PMD	Physical Medium Dependent
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RSU	Roadside Unit
SCH	Service Channel
SL	Status List
SNAP	Subnetwork access protocol
SR	Sensitive Range
STA	Station
TC	Technical Committee
US. DOT	Department of Transportation
UTC	Coordinated Universal Time
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VANET	Vehicular Ad hoc Network
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
WG	Working Group
WiBro	Wireless Broadband
WSA	WAVE Service Advertisement

WSM	WAVE Short Message
WSMP	WAVE Short Message Protocol
WSMP	WAVE Short Message Protocol

Chapitre I. Introduction

La communication véhiculaire universelle promet de nombreuses améliorations en termes de prévention des accidents et leurs réductions, une meilleure utilisation des rues et des ressources telles que le temps et le carburant, et de nouvelles opportunités pour des applications de divertissement. Cependant, avant la généralisation de son acceptation, les communications véhiculaires doivent faire face aux problèmes comparables à ceux qui ont accompagné l'introduction du feu de circulation à l'époque.

Le premier feu de circulation a été installé en 1868 à Londres pour signaler les chemins de fer [LI09]. Ensuite, il s'est écoulé 44 années avant que le premier feu de circulation électrique rouge-vert a été inventé (en 1912). C'est seulement en 1920 que le premier feu de signalisation à quatre voies comparable à celui d'aujourd'hui a été introduit.

L'introduction des signaux de trafic était nécessaire après l'invention de l'automobile et ils se sont répandus rapidement une fois la première voiture dans l'histoire (une moto en bois) est construite (en 1885). Très rapidement, la gestion des voitures est devenue complexe et nécessite l'introduction du concept de priorité de passage (priorité à droite). Toute cette signalisation est nécessaire pour accompagner l'émergence de l'automobile, afin de protéger les conducteurs, les passagers, ainsi que les piétons et les autres habitants de l'infrastructure routière. De la même façon, la communication véhiculaire est nécessaire pour gérer la croissance du volume de trafic routier et réduire le nombre d'accidents d'une façon significative.

Les communications véhiculaires ne créent pas seulement un horizon virtuel d'information, n'avertissent pas seulement les conducteurs des dangers connus, ni n'évitent seulement les accidents, mais, grâce à la communication à courte portée entre véhicules, elles permettent également de réduire les accidents inévitables.

En outre, comme les systèmes se stabilisent, les communications véhiculaires peuvent évoluer en paradigmes comme ceux de la conduite coopérative. Ceci est analogue aux feux de circulation qui ont évolué à partir des lampes contrôlées par l'homme à des systèmes de gestion automatique du trafic. Déjà de nos jours, la littérature suggère que la conduite coopérative est plus efficace, et offre plus de sécurité routière et d'améliorations à la stabilité du flux de trafic.

Le comportement coopératif est très bénéfique pour améliorer les applications telles que l'adaptation automatique de la vitesse en fonction du véhicule devant soi (chaque véhicule est conduit par un conducteur humain), ou le suivi automatique d'un autre véhicule, formant un peloton de véhicules (seul le premier est contrôlé par un conducteur humain). Ce comportement coopératif peut encore aller beaucoup plus loin. Il peut offrir pour la première fois une solution possible pour exécuter des applications telles que l'évitement des accidents entre les véhicules sur la route.

Aujourd'hui, l'objectif de la conduite coopérative est de corriger les erreurs dans des situations dangereuses au nom du conducteur.

I.1 Pourquoi les réseaux véhiculaires ?

Au début de l'industrie de l'automobile, les rues et les différents types de véhicules ont été considérés comme systèmes autonomes. Plus tard, l'influence des uns sur les autres, partageant des ressources communes, a nécessité l'adoption de règlements sur les rues qui, encore une fois, ont été considérés comme des systèmes de véhicules autonomes. Aujourd'hui, le nombre d'accidents et d'embouteillages est en augmentation, en raison d'un nombre croissant de véhicules et d'un partage déséquilibré des ressources.

En septembre 2001, la Commission européenne a présenté le livre blanc intitulé: «La politique européenne des transports à l'horizon 2010 », qui stipule que l'objectif principal jusqu'à 2010 est de réduire de 50% le nombre de tués sur les routes. À la même période, toute l'Europe favorise une politique de sécurité routière intégrée avec une attention particulière à la prévention des accidents, à la sécurité passive, à une bonne gestion des urgences, à équiper l'infrastructure routière avec des systèmes innovants, à échanger des informations avec les véhicules et les centres de services, et à l'introduction des systèmes de support de la conduite pour améliorer la sécurité routière préventive. Une brève comparaison entre le nombre de tués sur les routes Européennes (environ 50.000 chaque année) et le nombre croissant de voitures qui circulent sur les routes européennes (jusqu'à 222 millions de voitures en 2005 [LSEU]) donne une idée de l'effort nécessaire pour atteindre l'objectif fixé sur la sécurité routière.

L'étape suivante sera de créer une nouvelle manière de contrôler le système. Il s'agit de nouveaux types d'applications qui permettront à la voiture de l'avenir, entièrement automatisée, de conduire par elle-même.

Aujourd'hui, l'accent est mis principalement sur l'automatisation de certaines manœuvres spécifiques vues par les conducteurs. Sans automatisation, ces manœuvres conduisent à un

nombre croissant d'accidents. Des exemples de telles applications sont les suivants : adaptation automatique de la vitesse sur l'autoroute, entrée automatique sur la route ou dans un parking. Pour réaliser ces tâches, un grand pas en avant serait d'utiliser la perception de l'environnement via la communication entre les véhicules dans ce que l'on appelle une approche coopérative [APC2C].

La recherche sur les systèmes de transport intelligents remonte à la fin des années 1980 et au début des années 1990. Depuis ses débuts, les recherches ont évolué des systèmes des autoroutes autonomes (AHS) à l'Initiative pour les Véhicules Intelligents (IVI), en essayant d'améliorer la sécurité routière (conducteurs et autres usagers de la route), l'efficacité de l'utilisation des ressources (utilisation des routes ainsi que l'utilisation de carburant) et de la navigation/Advanced Driver Assistant Systems (ADAS).

Depuis le début, les recherches sur les systèmes de transport intelligents portent sur trois objets, et peuvent éventuellement être améliorées : les véhicules (i.e. régulateur de vitesse adaptatif, systèmes anticollision), les routes (i.e. régulation de vitesse adaptative, fonctions avancées de gestion de trafic), et les conducteurs (par exemple en fournissant des informations sur le trafic à l'avance, avertissements des collisions). Bien sûr, la plupart des projets de recherche a suivi une approche mixte, en essayant d'améliorer les trois domaines à la fois.

Différents avertissements, sur les incidents de la route ou des alertes de circulation ainsi que l'amélioration des applications classiques telles que l'adaptation automatique de la vitesse en fonction du véhicule précédent (*Cooperative Adaptive Cruise Control*) [ADV06], le changement coopératif de voie sur la route (*Cooperative Merging*), le groupement coopératif de véhicules (*Cooperative Platooning*), l'évitement coopératif d'accidents (*Cooperative Collision Avoidance*) sont des exemples d'applications sur les communications véhiculaires.

Le mot "coopératif" des applications ci-dessus signifie que les véhicules coopèrent les uns avec les autres en échangeant des informations par des moyens de communication véhicule à véhicule. Cette communication fournit des fonctionnalités telles que : une vue totale autour du véhicule pour fournir une plus grande zone de couverture dans toutes les directions, des avertissements sur les différents dangers cachés tels que les accidents ou les obstacles derrière une courbe.

De telles caractéristiques sont irréalisables avec les technologies existantes telles que les « capteurs basés radar ». Un gros inconvénient des capteurs est qu'ils sont influencés par les conditions climatiques et par la boue ou la poussière.

I.2 Couche MAC: Difficultés et Exigences

De manière générale, la nature même des réseaux VANETs présente des particularités qui rendent difficile la conception de ces réseaux. On peut citer par exemple : le fonctionnement en semi-duplex, le canal dont les caractéristiques varient dans le temps, les taux d'erreur binaires élevés par rapport aux réseaux filaires, et le fait que l'écoute du canal dépende de la position (qui varie de surcroît) et qui entraîne des phénomènes de type terminaux cachés. Quand deux *transceivers* sans fil ne peuvent pas se détecter l'un l'autre en raison des caractéristiques de propagation radio, ils peuvent envoyer des paquets en même temps, provoquant ainsi une collision de paquets au niveau du récepteur qui est dans la couverture de transmission des deux émetteurs. Ce problème bien connu de nœuds cachés affecte de façon significative les réseaux VANETs puisque les émetteurs ne sont pas coordonnés par une entité centrale et ne sont pas dans une seule cellule où chaque véhicule peut détecter les autres véhicules.

Par ailleurs, l'absence d'un coordinateur des communications dans les VANETs rend difficile la mise au point de réseaux optimaux. Bien que quelques applications requièrent une infrastructure (comme l'avertissement de violation d'un feu de signalisation), plusieurs applications sont prévues pour fonctionner en utilisant des communications décentralisées. Puisqu'aucune coordination centrale ni protocole de *handshaking* ne peut être supposé, et étant donné que beaucoup d'applications vont diffuser des informations intéressantes beaucoup de voitures environnantes, un canal de contrôle partagé est nécessaire. Même lorsque des canaux multiples sont disponibles en utilisant un ou plusieurs *transceivers*, il faut avoir malgré tout au moins un canal de contrôle partagé qui serve de point de rendez-vous où tous les nœuds peuvent recevoir les informations importantes ou la signalisation. Cette nécessité d'avoir un canal de contrôle, avec l'exigence d'un contrôle distribué, conduit à certains problèmes spécifiques dans la conception des réseaux VANET.

Les couches MAC des VANETs doivent être conçues en prenant en compte les phénomènes de terminaux cachés, particulièrement prégnants dans ce contexte, la nécessité d'un passage à l'échelle et les communications en diffusion. La bande de fréquence des canaux actuellement alloués pour les applications VANET varie de 10 à 20 MHz. Avec une haute densité du trafic routier, ces canaux peuvent facilement souffrir de la congestion de canal. Par conséquent, avec une haute densité véhiculaire, la réception des paquets doit être un standard et non seulement une exception. La communication dans les réseaux VANET est par essence une communication par diffusion : quand un véhicule transmet un message, ce message peut être reçu par plusieurs véhicules voisins mais en réalité il devrait être recevable par tous les véhicules environnants, du fait que le message peut avoir de l'importance pour des raisons d'efficacité et/ou de sécurité

routière. Pour les applications de sécurité routière, on suppose que chaque véhicule transmet périodiquement des informations de statut à ses véhicules voisins. Le mode fondamental de communication est donc plutôt celui de messages de diffusion à un seul saut. De plus, les messages urgents exigent une diffusion d'information rapide et efficace. Aussi, il faut assurer la qualité de service avec une robustesse de communication et la différenciation entre les différents types de communication. Ceci requiert de mettre en œuvre des méthodes de contrôle de congestion efficaces.

Les métriques de performance de couche MAC comme le débit, le temps de réponse, l'équité, la stabilité, la robustesse contre l'atténuation du canal ou tout autre problème de transmission, et la garantie de la QoS, sont alors utilisées pour évaluer les propositions MAC des VANETs. Le nombre moyen des paquets reçus en fonction de la distance à l'émetteur représente un critère clef des messages diffusés à un seul saut. Cette métrique représente le taux de réception des messages diffusés à un seul saut sans retransmission. Pour les messages de diffusion à un seul saut, le temps d'accès au canal est utilisé comme critère de performance pour le délai. Les différents types de messages sont transmis au niveau d'un seul canal (le canal de contrôle). Du fait que certains peuvent être plus urgents que d'autres, la priorisation de messages peut être une caractéristique importante pour une approche MAC.

Evaluer les performances des réseaux VANETs dans ce contexte, c'est-à-dire dans le cas des communications véhiculaires sans infrastructure à multiple canaux, et au niveau des couches inférieures du standard 802.11p est justement l'objet de cette thèse de doctorat. Certains travaux présentés ici sont financés par une bourse d'excellence Eiffel, allouée par le Ministère des Affaires Étrangères et Européennes.

I.3 Plan de la thèse et contributions

Cette thèse est composée de six chapitres dont le **premier chapitre**, cette introduction, et la conclusion.

Les développements technologiques spécifiques aux réseaux véhiculaires sont présentés dans le **deuxième chapitre** plus en détails avec leurs spécifications et leurs rôles. Les problèmes vus dans la couche MAC du standard 802.11p y sont aussi traités.

Dans le **chapitre 3** une nouvelle approche MAC d'allocation multicanal dans un contexte sans infrastructure (donc pas de station de base) est proposée. Cette approche est conforme à la norme IEEE1609.4 -2010 de l'architecture WAVE pour un fonctionnement multicanal, et elle est

conçue pour des applications de services de données (non urgentes), tout en maintenant la transmission des messages de sécurité routière et des paquets de contrôle. Pour assurer la qualité de service entre deux types de trafics, urgent et données, deux solutions sont proposées. La proposition vise à exploiter la rapidité d'un mécanisme opportuniste pour la sélection du canal dans le contexte multicanal. De plus, la communication multicanal imposant un canal de contrôle que tous les nœuds viennent écouter régulièrement pour y recevoir les données urgentes ou la signalisation, des périodes de temps sont prévues pour l'écouter, ce qui ne permet pas de profiter pleinement de la capacité de tout le spectre pendant celles-ci. Une autre contribution de ce chapitre est justement de proposer un mécanisme pour diminuer le temps perdu à revenir sur ce canal de contrôle si aucun trafic n'y est transmis.

Après avoir alloué les canaux aux véhicules, la décomposition temporelle entre canaux de contrôle (CCH) et canaux de services (SCH) étant définie, les véhicules commencent à transmettre leurs paquets, essentiellement sur le canal CCH. Le trafic étant diffusé, avec une contrainte de péremption qui fait que la durée de vie de l'information est très courte, il faut un mécanisme pour diminuer les collisions, ou les envies de transmettre simultanément, pour ne pas la perdre par inhibition. De plus, l'alternance entre canal de contrôle et canaux de service, où des trafics propres à chaque type de canal sont transmis et donc ayant chacun des files d'attente propres, a pour effet de remplir les files d'attente du canal de contrôle pendant l'écoute ou la transmission sur le canal de service et les files d'attente du canal de service pendant le retour sur le canal de contrôle, ce qui entraîne une surcharge temporelle de trafic plus importante en début d'intervalle et donc une contention plus élevée. Dans le **quatrième chapitre** nous présentons une approche aidant les équipements à transmettre leurs paquets en diminuant le taux de collisions (et d'inhibition), tout en évitant la contention de début d'intervalle, en particulier lorsque la densité de véhicules est élevée.

Même avec cet arsenal de propositions, les collisions entre les paquets diffusés sur le CCH sont difficilement évitables surtout quand la charge des messages dépasse la capacité du canal. Pour cela, nous proposons, dans le **chapitre 5**, un nouveau mécanisme de codage réseau analogique adapté à la modulation QPSK pour les messages diffusés sur le CCH. Dans cette approche des symboles connus sont envoyés avant les paquets pour estimer les paramètres du canal et une solution explicite est utilisée pour inverser le système de la superposition de deux paquets. En ajoutant un peu d'information, notre proposition permet la réception correcte de deux paquets entrés en collision. Ce mécanisme peut être vu comme un mécanisme ZigZag proactif, particulièrement utile dans le contexte si volatile des réseaux VANETs où les retransmissions doivent être évitées autant que possible, à la fois pour gagner du temps et parce

que le changement possible de topologie peut rendre impossible la retransmission, et où de toute façon le trafic le plus important est diffusé et ne permet donc pas l'utilisation d'acquittements rendant impossible des mécanismes réactifs comme ZigZag.

I.4 Problématiques

I.4.1 Première problématique : Allocation de ressources

Le groupe de travail IEEE 1609 WG a récemment publié la norme IEEE 1609.4 de transmission multicanal qui permet à un périphérique de changer de canal au cours temps et donc d'utiliser efficacement le spectre dont il dispose. Le concept de ce protocole repose sur deux points. Le premier est la nomination d'un canal comme canal de contrôle (CCH), les six autres canaux étant considérés comme des canaux de service (SCH). Le CCH est principalement utilisé pour deux types de messages: (i) les messages de sécurité routière d'un véhicule à l'autre, et (ii) les annonces de service WAVE (WSA) utilisées pour annoncer la disponibilité d'un ou plusieurs services WAVE sur les SCHs au cours du prochain intervalle SCH. Le deuxième point est la répartition dans le temps entre les canaux, où le temps est divisé en intervalles de temps périodiques. On suppose en effet que chaque véhicule ne peut physiquement émettre ou écouter que sur un canal à la fois. Chacun de ces intervalles est composé d'un intervalle pour écouter le canal de contrôle CCH suivi d'un intervalle d'écoute d'un canal de service SCH.

Si un véhicule a un service de données à offrir, il doit choisir un canal de service dans lequel il peut transmettre ses services pendant l'intervalle SCH. Le numéro de canal correspondant est transmis au récepteur via le paquet d'annonce de service (WSA), envoyé par l'émetteur sur le canal de contrôle (CCH) et pendant l'intervalle CCH. Dans les réseaux véhiculaires possédant une grande couverture de transmission, de l'ordre de 1000m, le canal de service sélectionné peut être fortement occupé surtout dans les cas de haute densité véhiculaire. Une question importante est alors d'augmenter la probabilité de sélection d'un canal libre à un temps donné.

Normalement, les messages de sécurité routière et les paquets de signalisation sont transmis sur le canal CCH pendant l'intervalle CCH, et les paquets de données sont envoyés sur un des canaux SCHs pendant l'intervalle SCH. Cependant, la dernière version de la norme IEEE 1609.4 à 2010 permet un accès immédiat au canal SCH sans attendre le prochain intervalle SCH. Elle prévoit également un accès étendu au SCH qui permet aux communications, dans le cas où l'envoi des services n'est pas terminé, de continuer l'accès au canal SCH durant l'intervalle réservé au CCH.

Le deuxième problème à résoudre c'est de savoir comment le dispositif peut rester à l'écoute d'un canal SCH pendant un intervalle de CCH et de répondre, en même temps, aux exigences de sécurité routière, de bien recevoir les messages de sécurité routière qui sont transmis pendant l'intervalle CCH. Dans certaines mécanismes d'allocation de canal, comme notre première approche proposée dans cette thèse, il est important pour le véhicule d'être au courant des paquets de signalisation échangés entre les voisins pour faire une liste sur l'état des canaux de service.

Durant la première partie de cette thèse, une nouvelle approche MAC d'allocation à multicanaux sans avoir de station de base est proposée. Cette approche est conforme à la norme IEEE1609.4 -2010 de l'architecture WAVE pour un fonctionnement multicanal, et elle est conçue pour des applications de services de données (non urgentes), tout en maintenant l'acheminement des messages de sécurité routière et des paquets de contrôle.

I.4.2 Deuxième problématique : Diffusion des paquets sur le canal de contrôle d'IEEE1609.4

La norme IEEE 1609.4 est la spécification multicanal pour l'IEEE802.11p/WAVE des réseaux véhiculaires (VANETs). Elle utilise sept canaux, dont l'un est un canal de contrôle (CCH) qui est écouté par les équipements de façon périodique, et les six autres canaux sont utilisés comme canaux de service (SCH). Elle définit également une division du temps en alternance entre les intervalles CCH et les intervalles SCH. La synchronisation entre les deux intervalles suppose que tous les équipements ont accès au temps universel coordonné (UTC), par exemple à partir d'un signal GPS.

Un des problèmes difficiles dans ce genre de systèmes est la diffusion de messages que ce soit pour la sécurité routière ou pour la signalisation. En effet, d'une part un changement de canal entraîne une contention plus importante en début de période, comme évoqué ci-dessus. Comme expliqué dans [IE410], un équipement WAVE peut mettre en file d'attente un MPDU (MAC Protocol Data Unit) à un moment où le canal destiné n'est pas disponible. Par exemple, un MPDU destiné à être envoyé sur le CCH pendant l'intervalle CCH peut être placé dans sa file d'attente pendant l'intervalle SCH. Dans un scénario encore pire, les files d'attente de la couche MAC peuvent s'accumuler dans l'équipement si des multiples MPDU doivent être envoyés.

Le paragraphe 5.2 dans le standard 802.11 stipule qu'un MPDU qui est en tête d'une file d'attente à la fin d'un intervalle de garde, attend un temps de back-off aléatoire avant de tenter d'accéder au canal. Cela permet d'éviter, mais n'empêche pas, les collisions entre les MPDUs de différents équipements. En particulier, si deux des MPDUs dans les nœuds voisins choisissent le

même instant de back-off, ils sont susceptibles d'entrer en collision. Si un grand nombre de dispositifs voisins ont des paquets en file d'attente à la fin d'un intervalle de garde, la probabilité de collisions peut être beaucoup plus élevée que la normale; dans le cas où il ya plusieurs MPDUs dans la file d'attente de la couche MAC, la durée du phénomène de collision de paquets est encore plus longue. Ces collisions peuvent conduire à une dégradation grave des performances des applications.

Par ailleurs, lorsque la densité du véhicule est élevée, la probabilité d'avoir deux ou plusieurs véhicules ayant les mêmes instants de back-off augmente, et de même pour la probabilité de collision. Normalement, l'incrémentation de la fenêtre de contention (CW) entraîne une diminution de la probabilité de collision. Mais si CW augmente, le temps d'attente avant de transmettre un paquet augmente et il en résulte une augmentation du taux d'inhibition de paquets à cause de leur date de péremption.

L'absence d'acquiescement pour les messages de diffusion rend l'adaptation de CW très difficile. La solution proposée dans la norme IEEE 802.11 MAC, temps de back-off et procédure d'accès DCF, pour minimiser les collisions pendant ces périodes de haute charge n'est pas efficace pour les MPDU de diffusion comme pour l'unicast. Cela est dû au fait que le mécanisme d'adaptation unicast s'appuie sur les accusés de réception qui ne sont pas autorisés pour les messages de diffusion.

Lorsque le taux de génération de messages est élevé, le nombre de messages en attente dans la file d'attente augmente et donc aussi la probabilité de collision, particulièrement si la densité des équipements qui passent au même intervalle CCH est grande.

C'est dans la deuxième partie de cette thèse que nous présentons une approche aidant les émetteurs à transmettre leurs messages en diminuant les collisions tout en évitant la contention de début d'intervalle, en particulier lorsque la densité de véhicules est élevée.

I.4.3 Troisième problématique : Codage Réseau Analogique pour la diffusion des paquets sur CCH

Dans la norme IEEE 1609.4 multicanal pour les VANETs, les nœuds échangent les données dynamiquement sur plusieurs canaux, et ils consacrent un de leurs canaux comme canal de contrôle (CCH) pour transmettre la signalisation ou les messages courts comme les annonces de service, les données étant envoyées sur les canaux de service (SCH). Les nœuds basculent périodiquement entre le CCH et le SCH. Les messages sont envoyés sur le CCH par diffusion. Ces messages peuvent être pour la sécurité ou pour l'annonce d'un service d'application. Ils peuvent être périodiques ou « event-driven ». Les messages coopératifs de

contexte (CAM), diffusés pour les applications de sécurité, sont des exemples des messages périodiques.

Avec une grande probabilité, plusieurs véhicules peuvent diffuser leurs balises ou messages en même temps. Ces messages doivent être également rediffusés pour atteindre tous les véhicules dans la zone géographique. En cas d'inondation, les accusés de réception ne sont pas utilisés et aucune retransmission ne se fait. Parfois il y a des contraintes de très courtes durées pour le délai d'acheminement du message. Les balises doivent être correctement acheminées dans un intervalle de CCH (46ms sans l'intervalle de garde). Lorsque les accusés de réception sont utilisés, la diminution des retransmissions en raison d'erreurs diminue les temps de retransmission.

La plupart des solutions proposées (par exemple, [SCB11] et [RE⁺11]) au niveau de la couche MAC tentent de minimiser la probabilité de collision entre les véhicules en optimisant le mécanisme de back-off avant la transmission. Cependant, même si les transmissions sont parfaitement ordonnancées, le problème n'est pas totalement résolu. Par exemple, avec un lien de 6 Mbps, une durée de l'intervalle CCH de 46ms et une longueur de message de 400 octets, 86 messages seulement peuvent être envoyés, ce qui correspond à 43 véhicules par voie sur une route à deux voies, si chacun des véhicules est prêt à envoyer un message sur le CCH, ce qui correspond à 43 véh./voie/km, la portée de communication pour chaque véhicule pouvant atteindre 1000m. Cependant, la densité moyenne de véhicules est comprise entre 25 et 31 véh./km/voie tandis que la densité en embouteillage est habituellement de plus de 115 véh./km/voie [TRB00]. Bien sûr, la fréquence des messages doit être prise en compte, mais certaines applications nécessitent une densité de messages très élevée, et en cas de situations d'urgence comme les accidents, des cascades de messages se produisent en même temps que les embouteillages apparaissent.

La charge importante par rapport à la capacité rend cruciale la minimisation des erreurs dues aux collisions. La technique traditionnelle pour résoudre ces problèmes est d'éviter les interférences entre les nœuds en effectuant de l'ordonnancement des transmissions, du contrôle de puissance, ... Le codage réseau, qui consiste à envoyer des combinaisons linéaires des paquets qui peuvent être décodés après avoir reçu un nombre suffisant de ces combinaisons, est une solution pour diffuser plus efficacement les paquets et pour réduire au minimum les délais de transmission. Ici, le codage/décodage linéaire est fait au niveau de la couche réseau, ce qui signifie que, même si c'est un mélange de différents paquets par une combinaison linéaire, seulement un seul paquet doit être envoyé à un moment sur le support pour être reçu correctement. L'application du concept de codage réseau à la couche

physique est différente puisque plusieurs paquets peuvent être envoyés en même temps sur le support sans fil où ils sont superposés. Dans [ZLL06], un tel codage au niveau de la couche physique est présenté. Il nécessite la synchronisation au niveau symbole, de la fréquence et de la phase de la porteuse. Dans [KGK07], le concept du codage réseau analogique (ANC) est présenté, et dans lequel ces hypothèses de synchronisation sont relâchées.

Cependant, on suppose toujours, dans l'une ou l'autre de ces propositions de la littérature, que l'un des deux paquets superposés est connu pour inverser la combinaison linéaire. C'est le cas lorsqu'un des deux émetteurs est aussi le récepteur. L'algorithme de décodage ZigZag, proposé dans [GK08], récupère les paquets en collision dans 802.11 en exploitant les retransmissions. En raison de l'asynchronisme, ces collisions possèdent différents tronçons non interférés que ZigZag utilise pour effectuer l'inversion de la combinaison linéaire. Il ne suppose pas que l'un des paquets est connu, mais il nécessite des retransmissions qui ne sont pas possibles lorsque les paquets sont en mode de diffusion. Ces solutions ne sont pas adéquates pour les messages diffusés surtout dans un contexte véhiculaire puisque les paquets reçus ne sont généralement pas connus, aucun accusé de réception ni de retransmission est utilisé et la modulation est de type QPSK (l'ANC utilise la modulation MSK).

C'est pourquoi nous proposons dans la troisième partie de cette thèse, un nouveau mécanisme adapté à QPSK où des symboles connus sont envoyés avant les paquets pour estimer les paramètres du canal et une solution explicite est utilisée pour inverser le système de la superposition de deux paquets.

Chapitre II. Etat de l'art des réseaux véhiculaires

II.1 Introduction aux réseaux véhiculaires

Les réseaux véhiculaires sont un nouveau domaine d'intérêt dans la communauté des communications sans fil ainsi que celle des recherches en transport. Le potentiel des réseaux véhiculaires à fournir des services comme l'information sur le trafic en temps réel ou sur les accidents, font de cette technologie un domaine de recherche très important.

Les réseaux véhiculaires peuvent comporter des communications véhicule-à-véhicule (V2V), véhicule-à-infrastructure (V2I), ou une combinaison des deux. En général, les réseaux constitués sans soutien de l'infrastructure sont appelés réseaux ad hoc. C'est pour cette raison que les réseaux véhiculaires avec des communications V2V ont parfois été appelés réseaux ad hoc véhiculaires (*vehicular ad hoc networks* - VANETs).

II.2 Développement des Standards pour les réseaux véhiculaires

Bien que de nombreux organismes de développement des normes ont une visée internationale, ils sont le plus souvent fortement influencés par les préoccupations et les intérêts particuliers des régions dans lesquelles ils sont les plus actifs. Dans cette partie, on examine quelques activités d'élaboration des standards pour la normalisation des réseaux véhiculaires pour les communications V2X.

II.2.1 Amérique du Nord

Aux États-Unis, 75 MHz de spectre entre 5,850 et 5,925 GHz, ont été attribués par la Commission fédérale des communications (FCC) en 1999 pour l'utilisation de systèmes de transport intelligents (ITSs) [FCC99]. Cette allocation spectrale a été l'un des points indispensables pour le développement des systèmes de Communications dédiées à courte distance (DSRC) de 5.9 GHz, en Amérique du Nord.

II.2.1.1 American Society for Testing and Materials International (ASTM)

En 2003, la FCC a publié un rapport comportant un ordre pour l'utilisation du spectre de 5,9 GHz pour les services d'ITS [FCC03]. Cet ordre spécifie l'utilisation du standard ASTM E2213-03 – ‘*Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems – 5 GHz Band DSRC Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*’. Cette norme ASTM a été principalement fondée sur le standard IEEE 802.11a qui utilise le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) dans le spectre de 5,8 GHz sans licence. Cependant, la version ASTM a fait plusieurs ajustements à la norme IEEE 802.11a afin de faciliter le mouvement des véhicules sur l'autoroute à des grandes vitesses, en plus d'autres circonstances spéciales pour les besoins anticipés des communications V2X. Cette norme ASTM est remplacée par le travail qui a été entrepris dans le comité de l'IEEE 802.11p.

II.2.1.2 IEEE 802.11p

La spécification des couches PHY et MAC des systèmes DSRC de 5,9 GHz pour la norme ASTM, il a été décidé par les participants que ce travail devrait être ramené au groupe de la norme IEEE 802.11. Cette décision a été basée sur l'utilisation intensive de la norme IEEE 802.11a dans la norme ASTM, et sur le besoin prévu pour garder les couches PHY et MAC du 5,9 GHz compatibles avec la suite de l'évolution de la norme IEEE 802.11.

En général, la normalisation de l'IEEE 802.11p se concentre sur les améliorations apportées à la norme IEEE 802.11, et qui sont nécessaires pour communications sans fil à courte portée pour l'ITS. Au delà de 2009, et après la présentation d'une pétition à la FCC pour utiliser cette norme dans le spectre 5,9 GHz du DSRC, son occupation est changé de l'ASTM E2213-03 à IEEE 802.11p. Comme mentionné ci-dessus, l'IEEE 802.11p PHY a adopté l'approche OFDM de la norme IEEE 802.11a, avec 52 sous-porteuses, mais il utilise un canal de 10 MHz de largeur plutôt que 20 MHz dans la norme IEEE 802.11a. L'OFDM de la norme IEEE 802.11p utilise les mêmes modulations d'IEEE 802.11a : Binary Phase-Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), et Quadrature Amplitude Modulation (QAM)[IEP09].

Pour IEEE 802.11p, les débits de données obligatoires sont 3, 6 et 12 Mbit/s, le 27 Mbit/s est encore possible avec une modulation 64-QAM. Ces modifications à la norme IEEE 802.11a permettent à l'IEEE 802.11p de fonctionner d'une manière plus fiable dans l'environnement véhiculaire où des communications de durées très courtes sont nécessaires pour la sécurité des véhicules et d'autres applications, et où les situations multiauts évoluent très rapidement avec

le mouvement rapide des véhicules les uns rapport aux autres (et l'unité routière). Plus de détails peuvent être vus dans la section de la couche physique.

La norme IEEE 802.11p permet aux véhicules d'échanger des messages sans nécessairement avoir la nécessité de passer par une infrastructure, en utilisant des protocoles de diffusion de messages.

II.2.1.3 IEEE 1609

IEEE 1609 représente une famille de normes qui fonctionnent dans les couches intermédiaires de la pile de protocoles. Ces normes ont été conçues pour assurer des applications de sécurité routière et de mobilité qui utilisent des communications V2V à courtes portées ainsi que des communications V2I (véhicule-infrastructure) comprennent la prévention de collision des véhicules, la gestion du trafic routier, l'amélioration de la navigation et le péage automatisé, etc. [IEW7], sont des exemples de types d'applications reposant sur ces normes.

○ SAE J2735

Le SAE J2735, issu par le comité technique du DSRC, assure l'interopérabilité pour permettre de nombreuses applications de sécurité routière à travers l'utilisation de messages normalisés, de trames de données et d'éléments de données (USDOT 2006). Par exemple, SAE J2735 fournit un message de sécurité routière appelé *Basic Safety Message* (BSM) ou le message '*heartbeat*' qui a été explicitement conçu pour supporter les communications V2V de prévention de collision. Ce standard est normalisé spécifiquement pour le protocole DSRC 5.9 GHz et reprend les standards IEEE 1609 et IEEE 802.11p au niveau des couches inférieures.

II.2.2 Europe

En Europe, les progrès dans les communications V2X, pour des buts de sécurité des transports d'intelligents, se sont accélérés à partir de l'attribution de 30 MHz de spectre, de 5,875 à 5,905 GHz, en août 2008. Cette allocation était destinée à être harmonisée dans l'ensemble des états membres de l'Union Européenne (UE). Les membres ont été invités à désigner cette bande pour les communications de sécurité routière V2V dans un délai de six mois, et à planifier l'octroi de licences aux communications véhicule-Infrastructure (V2I) dès que leur situation locale le permettent. Les différentes allocations du spectre par chaque nation ont été un obstacle majeur au progrès de cet accord dans l'UE. L'allocation de 30 MHz de spectre a fourni une cohérence des fréquences de spectre dans l'UE, et un certain degré de cohérence au niveau des développements similaires à l'échelle mondiale. Bien que cette allocation n'est pas exactement la

même que celle du spectre en Amérique du Nord (5,9 GHz), elle est à l'intérieur de sa gamme de fréquences, ce qui devrait faciliter l'utilisation des mêmes antennes et chipsets des *transceivers*.

Les régions telles que l'Europe ont des organismes de normalisation qui relient les normes internationales aux exigences particulières de la région. L'Europe a donc une organisation régionale - le Comité Européen de Normalisation (CEN) - qui représente les intérêts des régions liées aux normes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). De même, le Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC) fournit la relation régionale avec la Commission Electrotechnique Internationale (IEC). La troisième grande organisation européenne de normalisation est l'Institut Européen des Normes de Télécommunications (ETSI), qui a le même type de relations avec l'Union internationale des télécommunications (UIT). Les développements des standards de l'Union européenne ont été harmonisés dans une large gamme de développements similaires en Amérique du Nord. En général, les développements actuels supportent un point de vue optimiste dans lequel les standards de communications véhiculaires peuvent être coopérés et harmonisés à l'échelle mondiale..

II.2.2.1 Institut Européen des Normes de Télécommunications (ETSI)

Dans son rôle comme organisation régionale européenne de développement des normes de télécommunications, l'ETSI a créé un Comité technique (TC) pour élaborer des normes pour les transports intelligents (l'ETSI TC ITS). En réponse aux orientations de la Commission Européenne, ce comité a travaillé sur des normes et des spécifications qui vont supporter l'interopérabilité entre les véhicules et les équipements routiers dans toute la région européenne.

Les normes harmonisées sont censées être universellement adoptées dans toute l'Union Européenne. L'ETSI TC ITS est actuellement engagé dans le développement des standards harmonisés qui se rapportent à divers domaines des applications des systèmes de transports intelligents (ITS). L'un de ces domaines est l'Accès aux communications des services mobiles terrestres (CALM). Il est axé, comme son nom l'indique, sur les communications à couverture moyenne et large, impliquant les automobiles. Les domaines d'application envisagés par le CALM, sur plusieurs supports de communication, comprennent à la fois la sécurité routière et le divertissement.

Les normes harmonisées pour des systèmes de communication sans fil spécifiques sont également en cours de développement pour l'interconnexion des véhicules, en utilisant les spectres dans les gammes de 5 GHz et de 63 GHz. Un autre grand domaine d'application abordé est le télépéage (*Electronic Toll Collection* – ETC). Cet effort est ciblé au DSRC dans la

gamme de 5,8 GHz afin de fournir la connectivité nécessaire entre les automobiles et les unités routières.

- *CAR-2-CAR Communication Consortium*

Les constructeurs européens d'automobiles ont établi le *CAR-2-CAR Communication Consortium* (C2C-CC) pour améliorer la sécurité routière et l'efficacité en fournissant des communications interopérables entre les automobiles. Ce consortium comprend encore d'autres membres comme des fournisseurs et des instituts de recherche ainsi que d'autres parties intéressées. La notion technique de C2C-CC est basée sur le WLAN et les normes IEEE 802.11 et inclut l'idée de connexions automatiques entre les véhicules voisins. Ce réseau de connexion est envisagé pour fournir un mécanisme pour partager les informations entre les véhicules. Ce concept comprend l'idée des communications à multi-sauts où chaque véhicule peut fonctionner comme un routeur de paquets et connecter les véhicules qui ne sont pas dans les couvertures de communication l'un de l'autre [C2C09].

II.3 Méthodes d'accès sans fils dans les réseaux véhiculaires

Diverses méthodes de communications sans fil sont disponibles dans les réseaux véhiculaires i.e. DSRC/WAVE, cellulaires, le WiFi, le WiMAX, etc. Cependant, le standard DSRC/WAVE a été explicitement conçu pour cela afin de répondre aux problèmes spécifiques posés par cet environnement.

II.3.1 DSRC/WAVE

Les communications dédiées à courte portée (DSRC) sont des technologies de communication à portée courte et moyenne fonctionnant dans la bande 5,9 GHz [DSRC03]. Le Comité des normes E17.51 a approuvé une variante de la norme IEEE 802.11a MAC pour le lien DSRC. DSRC prévoit des vitesses de véhicules jusqu'à 193 Km/h, une couverture de transmission de 300 m jusqu'à 1000 m, et des débits de données de 6 Mb/s jusqu'à 27 Mb/sec. Cela permet de déclencher des opérations liées à l'amélioration du trafic routier, la sécurité routière, et d'autres applications du système de transport intelligent (ITS). Cette variété des environnements d'applications sont intégrés dans une technologie d'accès appelée DSRC/WAVE (*wireless access in a vehicular environment*)

Le DSRC dispose de deux modes de fonctionnement : (1) un mode ad hoc caractérisé par une interconnexion distribuée multisaut (véhicule-véhicule), (2) un mode infrastructure caractérisé par un réseau mobile centralisé à un seul saut (véhicule-passerelle). Notons que les passerelles, selon les scénarios de déploiement, peuvent être connectées l'une à l'autre ou à l'internet, et elles

peuvent être équipées des périphériques de traitement et de stockage, par exemple d'*Infostations* [FBBY02].

Par conséquent, le DSRC est divisé en deux types de communications : V2V et V2I. La communication V2V est utilisée lorsque les véhicules ont besoin d'échanger des données entre eux pour que les applications de sécurité routière fonctionnent correctement. La communication V2I est utilisée lorsque les unités routières (RSU) font partie des applications de sécurité routière.

II.4 Scénarios possibles des réseaux véhiculaires

Si les véhicules sont uniquement équipés de DSRC, on peut avoir un mode sans infrastructure (V2V), un mode avec infrastructure (V2I), et un mode mixte (V2V et V2I), comme illustré sur la Figure II.1. Ce scénario peut aussi être fait avec les périphériques Wifi. Le mode mixte a été largement étudié par les chercheurs en termes d'acheminement et de capacité du réseau. Si les véhicules sont seulement équipés par d'accès sans fil à large bande (i.e., cellulaires et WiMAX), on peut avoir un scénario où les véhicules peuvent communiquer les uns avec les autres via l'internet comme montre la Figure II.1b. Les utilisateurs de l'iPhone ou autres téléphones intelligents dotés d'un accès internet peuvent former un réseau P2P via internet. Un scénario d'accès mixte (Figure II.1c) est formé lorsque les véhicules possèdent l'accès DSRC et autres accès aux réseaux sans fil à large bande.

Les chercheurs se concentrent principalement sur le premier scénario. Cependant, le deuxième scénario a reçu beaucoup d'attention en raison de l'usage répandu des téléphones intelligents, ou WiBro [USDT05]. Jusqu'à présent, le troisième scénario n'a pas encore reçu l'attention, mais il a le potentiel d'émerger des nouvelles applications à l'avenir.

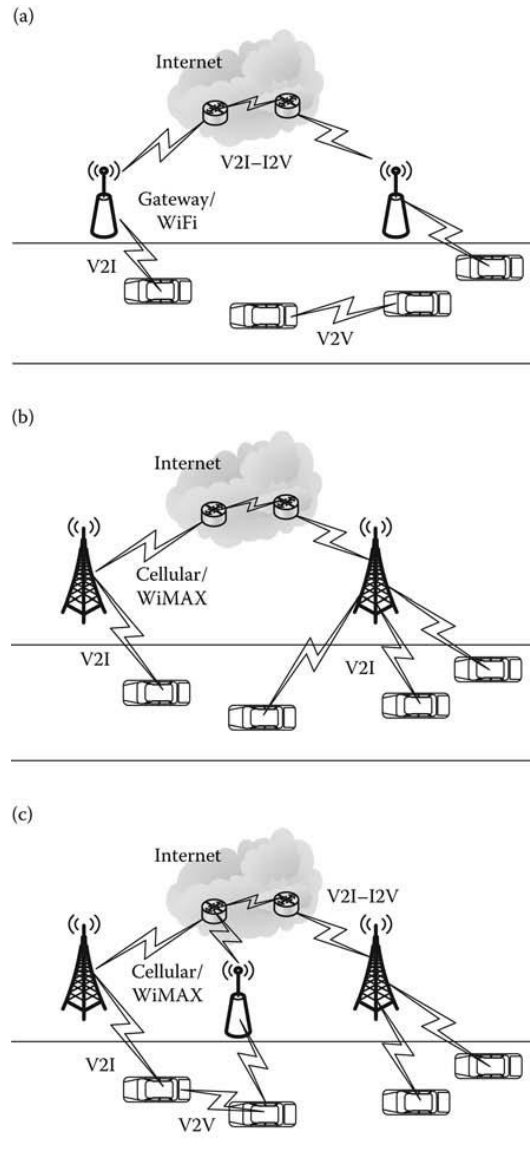


Figure II.1 : Scénarios possibles pour la connexion entre les véhicules : (a) DSRC/WiFi; (b) Cellulaire/WiMax; (c) DSRC/WiFi et Cellulaire/WiMax.

II.5 Caractéristiques des environnements VANET

Les VANETs ont beaucoup en commun avec les réseaux ad hoc mobiles (MANET) qui ont été bien étudiés. Les deux sont des réseaux ad hoc entre des nœuds mobiles qui sont capables de la communication sans fil. Cependant, les nœuds VANET sont des véhicules plutôt que des appareils de poche, pour cela il y a peu d'intérêt aux problématiques comme celles d'économie, de capacité de stockage, ou de puissance de calcul. En outre, les véhicules se déplaçant beaucoup plus rapidement que les hommes, les VANETs doivent prendre en considération le changement rapide de la topologie.

En effet, ces différences de caractéristiques et d'exigences ont un impact significatif sur les applications des infrastructures :

1. Les véhicules sont beaucoup plus réservés de puissance qu'un ordinateur portable. L'alimentation électrique peut être tirée à partir des batteries à bord qui peuvent être rechargées, si nécessaire, à partir de l'essence ou un autre combustible du moteur.
2. Les véhicules ont des ordres de grandeur plus importante en taille et en poids par rapport aux utilisateurs Wifi traditionnels, et peut donc comporter des dispositifs de traitement plus lourdes (informatique, capteurs). Ceci, combiné avec une puissante alimentation, signifie que les ordinateurs automobiles peuvent être plus grands, plus puissants, et équipés de périphériques de stockage de très grandes tailles (jusqu'à plusieurs téraoctets de données), ainsi que des *transceivers* sans fil capable de fournir des taux de transfert de données très élevés.
3. Les véhicules se déplacent à des vitesses allant jusqu'à 193 km/h, ce qui rend la communication V2V difficile à maintenir. Toutefois, les statistiques de la circulation des véhicules, tels que les modèles de trafic pendant certaines heures, peuvent aider à maintenir la connectivité entre des groupes de véhicules.

II.6 Applications de sécurité routière dans les réseaux véhiculaires

II.6.1 Introduction

Les communications sans fil et le *mobile computing* ont été améliorés pour conduire au développement de systèmes de transport intelligents (ITS). Dans de tels systèmes, l'important est d'améliorer la sécurité sur les routes puis de fournir des applications de confort.

Dans ce qui suit, on présente les applications de sécurité routière dans les réseaux véhiculaires ad hoc (VANET).

Selon le ministère des Transports des États-Unis. (U.S. DOT) (cf. [USDT05]) en 2005, plus de 43 000 personnes ont été tuées et plus de 2,6 millions ont été blessées dans des accidents de voiture dans les États-Unis. Ce nombre élevé de décès et de blessures coûte des milliards de dollars dans le secteur de la santé par rapport aux autres types de blessures ou de maladies. Ces problèmes font des technologies de communication pour la sécurité routière un domaine d'intérêt majeur pour les organismes gouvernementaux, les constructeurs de véhicules, ainsi que les chercheurs ces domaines d'applications.

L'émergence des réseaux véhiculaires a encouragé les chercheurs à étudier comment de telles communications peuvent être utilisées pour améliorer la sécurité routière des conducteurs. Au

cours des années récentes, les organismes gouvernementaux ont collaboré avec les fabricants d'automobiles pour faire la conception et le prototype de différents types d'applications véhiculaires pour la sécurité routière.

II.6.2 Nature des communications

La communication pour les applications de sécurité routière utilise le DRSC (*dedicated short-range communications*) [ASTM03].

Certaines applications de sécurité routière sont tenues d'envoyer périodiquement des messages (toutes les 100 msec), alors que d'autres applications de sécurité routière envoient des messages lorsqu'un événement a eu lieu [NH+05]. Toutes les applications de sécurité routière ont une portée de communication entre 100 et 1000 m et une fréquence de transmission minimale entre 1 et 50 Hz.

II.6.3 Types de messages

Toutes les applications de sécurité routière, qui sont basées sur le DSRC, nécessitent l'échange de messages avec d'autres véhicules. Ces applications peuvent obtenir des données provenant des capteurs, d'autres véhicules, ou les deux, selon la fonctionnalité de l'application.

Chaque application traite les données et envoie les messages à ses voisins ou à l'infrastructure. L'envoi de messages dans les applications de sécurité routière est nécessaire pour l'une des deux raisons suivantes : la prise de conscience de l'environnement ou la détection d'une situation dangereuse. Les messages qui sont envoyés à cause de la prise de conscience de l'environnement sont appelés messages périodiques, alors que ceux déclenchés par une situation d'insécurité sont appelés messages événementiels (*event-driven*).

II.6.3.1 Messages périodiques

Les messages périodiques sont générés pour informer les véhicules voisins sur la situation actuelle du véhicule, par exemple sur la vitesse, la position et la direction. Ils peuvent également inclure d'autres données que pour la sécurité. Les autres véhicules, par le traitement des données reçues en messages périodiques, peuvent anticiper des situations dangereuses avant qu'ils surviennent.

Les informations de messages périodiques sont importantes à tous les véhicules entourant le véhicule-émetteur, et elles doivent être diffusées fréquemment. Ces messages périodiques peuvent provoquer le problème bien connu des avalanches [TK06], conduisant à des conflits, des collisions de paquets, et finalement une utilisation inefficace du canal sans fil.

II.6.3.2 Les messages événementiels (*Event-Driven Messages*)

Les messages événementiels sont des messages d'urgence envoyés à d'autres véhicules pour des situations dangereuses détectées. En absence de situation d'urgence, les messages événementiels ne sont pas diffusés. Ce type de messages a une très haute priorité. Les messages *event-driven* contiennent la position du véhicule, l'heure et le type d'événement. La difficulté avec ce type de message est que l'émetteur doit s'assurer que tous les véhicules, destinés à bénéficier de ces messages, les reçoivent correctement et rapidement.

II.6.4 Diffusion de message (*Message Broadcast*)

La plupart des applications de sécurité routière échangent des types de données entre eux appelés éléments. Ces éléments de données (par exemple, vitesse, accélération, position) sont nécessaires pour différentes applications de sécurité routière afin de compléter leurs fonctions. La Figure II.2 présente plusieurs éléments de données et des applications qui les utilisent. Pour échanger les éléments de données d'une façon efficace, les véhicules exécutant plusieurs applications de sécurité routière ont besoin d'une méthode pour éviter la redondance.

En outre, certains éléments de données qui changent rapidement leurs valeurs (par exemple, position) doivent être envoyés fréquemment. Ces éléments de données doivent être rassemblés et comprimés dans un seul paquet. Ce paquet est alors envoyé aux véhicules et à l'infrastructure. À l'aide de la compression de données et la communication en diffusion à un seul saut, le nombre de messages à envoyer se réduit, ce qui améliore l'utilisation du canal.

Data Element	Signal Violation	Curve Warning	Emergency Brake	Precrash Warning	Collision Warning	Turn Assistant	Lane Warning	Stop Sign Assist	No. of Uses
Acceleration	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
Airbag count					✓				1
Antilock brake state	✓		✓		✓				3
DSRC message ID	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
Elevation		✓		✓					2
Heading	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
Speed	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	7
Vehicle length				✓	✓	✓	✓	✓	5
Vehicle mass		✓	✓	✓	✓				4

Figure II.2 : Répartition des Messages (*Message Dispatcher*)

II.6.5 Applications de sécurité routière

Actuellement, les technologies de sécurité routière dans les véhicules sont locales à un seul véhicule et ne communiquant pas avec d'autres (par exemple, capteurs de parking). Par conséquent, les véhicules ne sont pas capables de partager des données avec leurs voisins, ce qui

limite leurs capacités. De plus, ils ne fonctionnent que si les autres véhicules sont en ligne de vue directe. Ces problèmes ont conduit à la mise au point d'autres techniques pour améliorer la sécurité routière sur la route.

Le projet « Vehicle Safety Communications » [Res05] a été chargé de définir les applications de sécurité routière intelligentes sur DSRC [NH+05]. Ces applications ont été classées en cinq catégories différentes :

1. Prévention de collision en intersection (*Intersection collision avoidance*)
2. La sécurité routière publique
3. Extension de signe
4. Diagnostiques et maintenance du véhicule
5. Informations provenant d'autres véhicules

II.7 Applications VANET basées sur la position géographique

La plupart des applications VANET compte sur la disponibilité des informations de la position géographique en temps réel. Contrairement aux d'autres réseaux, cette disponibilité de la position une hypothèse très plausible dans VANETs, car les récepteurs GPS peuvent être facilement installés dans les véhicules, dont un certain nombre sont déjà déployés avec cette technologie. Dans cette section, nous divisons les applications VANET en trois groupes principaux, et nous montrons comment l'information de la position est utilisée par les protocoles et les algorithmes dans ces applications, ainsi que les exigences de localisation pour chacun d'eux.

Un certain nombre d'applications sont envisagées dans ces réseaux, dont certains sont déjà possibles dans certains modèles de véhicules (Figure II.3):

1. Système d'alerte de collision des véhicules
2. Avertissement de la distance de sécurité routière
3. Assistance à la conduite
4. Conduite coopérative
5. Adaptation coopérative du régulateur de vitesse
6. Dissémination des informations de la route
7. Accès internet
8. Localisation par la carte
9. Stationnement automatique
10. Véhicules sans conducteur

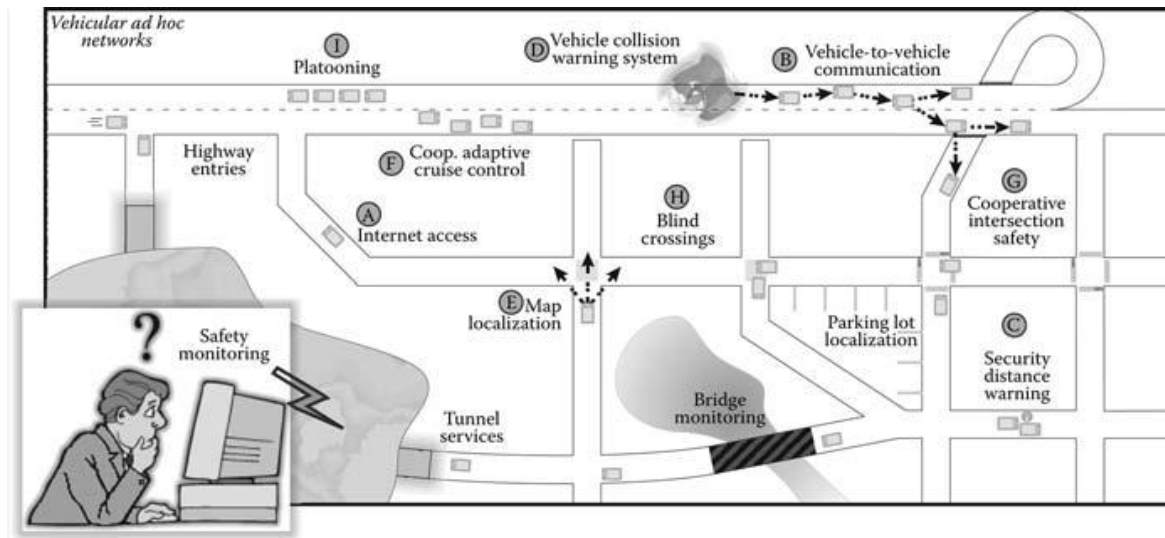


Figure II.3: Quelques applications VANET basées sur la localisation.

II.7.1 Communication des véhicules

La communication des véhicules est l'objectif principal des VANETs. Il comprend la communication V2V et V2I et fournit des services tels que le routage de l'information et la diffusion des données des incidents, la congestion routière, et ainsi de suite.

La plupart des protocoles de routage dans VANETs utilisent les informations de position [CC+06] afin d'améliorer leurs performances et être conformes aux exigences de VANET, tels que les changements dynamiques de la topologie et la fragmentation fréquente du réseau. Ces techniques de routage ont longtemps été utilisées dans les réseaux ad hoc networks, et la plupart d'entre elles peuvent également être appliquées aux VANETs.

Un exemple classique est le « *greedy forwarding* » dans lequel, à chaque étape, les informations de localisation sont utilisées pour transmettre un paquet au voisin le plus proche de la destination. Mais certains protocoles de routage géographiques ont également été spécialement conçus pour les VANETs, profitant plus de la connaissance géographique plus comme les cartes géographiques [THR03], et l'information du mouvement [KF+06]. Les techniques de routage sont aussi utilisées pour accéder aux réseaux locaux avec infrastructure, qui peuvent avoir des connexions internet. Dans ces cas, les informations de position, ainsi que des connaissances sur la future trajectoire, peuvent être utilisées pour aider le routage.

II.7.2 Assistance à la conduite

Dans les applications d'assistance au conducteur, les ressources VANET sont utilisées pour améliorer la perception du conducteur et de la connaissance de la route et de

l'environnement. Dans ces applications, le conducteur est informé de l'environnement, mais il maintient un contrôle total sur véhicule (sauf en cas d'urgence et d'autres procédures demandées).

Les systèmes d'avertissement de collision des véhicules sont l'une des applications les plus intéressantes des VANETs pour l'assistance au conducteur. Une des composantes de ces systèmes est l'avertissement de la distance de sécurité routière, dans laquelle le conducteur est averti lorsque la distance minimale à un autre véhicule est atteinte. Il peut également mettre en œuvre un frein de secours lorsque la distance entre deux véhicules ou entre un véhicule et un obstacle diminue trop rapidement. En ce qui concerne les exigences de localisation, fournissant une application critique pour une conduite sécurisée, ces applications nécessitent une estimation robuste et fiable de la distance locale, qui peut être faite en utilisant des capteurs et des caméras. Les positions GPS, qui sont moins précises, peuvent être utilisées pour avertir les véhicules éloignés sur l'emplacement d'un accident.

La localisation par carte, dans laquelle la position actuelle du véhicule est localisée sur une carte, est une application d'assistance au conducteur très connue et déjà utilisée. Dans ces applications, une direction de trajet entre deux points dans une ville par exemple, peut être tracée sur une carte indiquant la position actuelle du véhicule. Cette application peut aider les conducteurs dans des situations où ils se sont perdus dans une partie inconnue de la ville. En ce qui concerne les exigences de localisation, la localisation GPS est une technologie éprouvée pour fonctionner dans cette application, car les informations de la carte peuvent être utilisées pour surmonter l'inexactitude du GPS.

Une autre application d'assistance au conducteur est l'amélioration de la vision, dans laquelle les conducteurs possèdent une vision claire des véhicules et obstacles pendant les jours de brouillard, et peuvent se renseigner sur l'existence de véhicules cachés par des obstacles, des bâtiments, et autres véhicules. En ce qui concerne les exigences de localisation, un système de localisation avec une précision de quelques mètres combiné avec les informations de la carte, peut être utilisé pour localiser les véhicules éloignés et/ou cachés, tandis que les capteurs peuvent être utilisés pour localiser les obstacles sur la route ainsi que d'estimer avec précision les distances aux véhicules voisins.

Le stationnement automatique est une application grâce à laquelle le véhicule peut s'égarer sans la nécessité de l'intervention du conducteur. Concernant les exigences de localisation, afin de garer automatiquement, un véhicule doit avoir des capteurs pour l'estimation de la distance et / ou un traitement d'image/vidéo.

II.7.3 Conduite coopérative

Dans les applications de conduite coopérative, les véhicules dans VANET échangent des messages pour conduire et partager l'espace disponible dans la route en collaboration. Dans ces applications, le véhicule prend le contrôle partiel ou total sur la conduite. La principale caractéristique de ces applications est que les véhicules doivent coopérer les uns avec les autres afin d'accomplir un objectif commun.

Dans l'application d'adaptation coopérative du régulateur de vitesse, le véhicule conserve la même vitesse que ce soit en montant ou descendant une colline, sans l'intervention du conducteur. Habituellement, le conducteur définit la vitesse et le système prendra la relève, mais dans ce cas, les véhicules peuvent coopérer entre eux pour établir cette vitesse d'une manière adaptative. Cette application prend seulement la vitesse en charge, tandis que le conducteur doit contrôler la direction du véhicule. Les exigences de localisation pour ce type d'application comportent un certain degré de confiance dans l'estimation de la distance entre les véhicules. Puisque les récepteurs GPS voisins ont des erreurs corrélées (ils ont tous le même ordre d'erreur de l'amplitude et de la direction), ils peuvent être utilisés pour échanger les positions en vue de calculer la distance entre eux. Les capteurs peuvent également être utilisés pour accroître la confiance du système.

Une autre application intéressante dans VANET est la sécurité coopérative aux intersections, dans laquelle les véhicules, arrivant à une intersection de route, échangent des messages afin de rendre les carrefours plus sécurisés. En plus, il est possible de construire des carrefours aveugles où il n'y a pas de feu de circulation et les véhicules coopèrent entre eux pour faire un carrefour coopératif. Les exigences de localisation pour cette application incluent les informations de position comme une partie du processus de la prise de décision. La précision de la localisation doit permettre à l'application de différencier entre les voies et les côtés de la rue.

II.8 Techniques de localisation dans VANETs

Un certain nombre de techniques de localisation ont été proposées pour calculer la position des nœuds mobiles. Un aspect intéressant des VANETs est que la plupart des techniques de localisation peut être facilement appliquées à ces réseaux. La Figure II.4 illustre un certain nombre de techniques de localisation qui peuvent être utilisées par les véhicules pour estimer leurs positions: la correspondance cartographique, navigation à l'estime, localisation cellulaire, traitement image/vidéo, services de localisation, et la localisation relative à l'ad hoc distribué. Toutes ces techniques ont leurs avantages et leurs inconvénients.

Les systèmes de localisation future pour VANETs sont susceptibles d'utiliser une sorte de technique de fusion de données pour fournir aux véhicules une information de position précise et suffisamment robuste pour être appliquée dans des applications critiques. Différentes propositions utilisent des filtres particuliers [NLF07, FC⁺07] pour accomplir la fusion des informations.

Dans ce qui suit, nous expliquons trois de ces techniques.

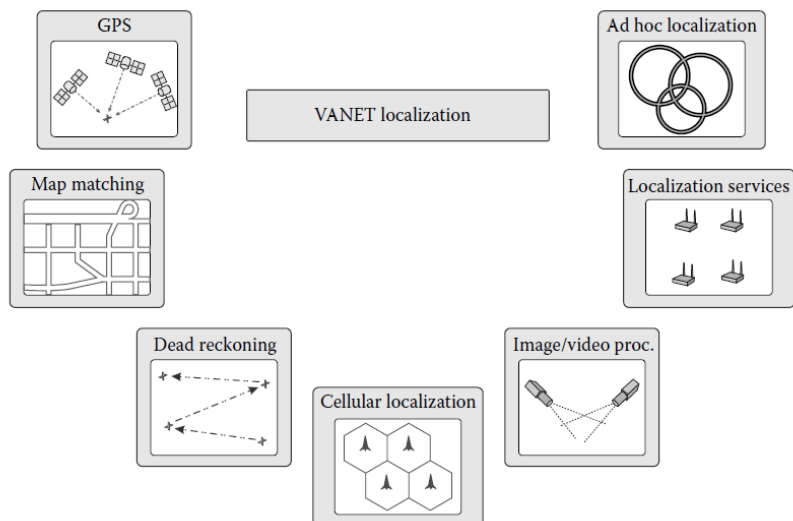


Figure II.4: Techniques de localisation dans VANET.

II.8.1 Système de positionnement global -GPS/DGPS

Le système de positionnement global (GPS) est composé de 24 satellites qui fonctionnent en orbite autour de la Terre. Chaque satellite entoure la Terre à une hauteur de 20200 km et fait deux rotations complètes chaque jour. Les orbites sont définies de telle manière que, dans chaque région de la Terre on peut «voir» au moins quatre satellites dans le ciel.

Un récepteur GPS est une pièce d'équipement qui est capable de recevoir en permanence les informations envoyées par les satellites, afin d'estimer sa distance à au moins quatre satellites connus en utilisant une technique appelée l'heure d'arrivée (ToA), et enfin, de calculer sa position à l'aide de la trilatération. Une fois ces procédures sont exécutées, le récepteur est capable de connaître sa latitude, longitude et altitude. La solution principale pour la localisation dans VANET est d'équiper chaque véhicule d'un récepteur GPS. C'est une solution raisonnable parce que les récepteurs GPS peuvent être facilement installés dans les véhicules, dont un certain nombre arrivent déjà avec cette technologie.

Cependant, comme VANETs avancent dans des zones critiques et deviennent plus dépendants des systèmes de localisation, les récepteurs GPS peuvent avoir certains problèmes indésirables, d'où l'utilisation d'autres systèmes supplémentaires (Figure II.5) sera utile et fiable.

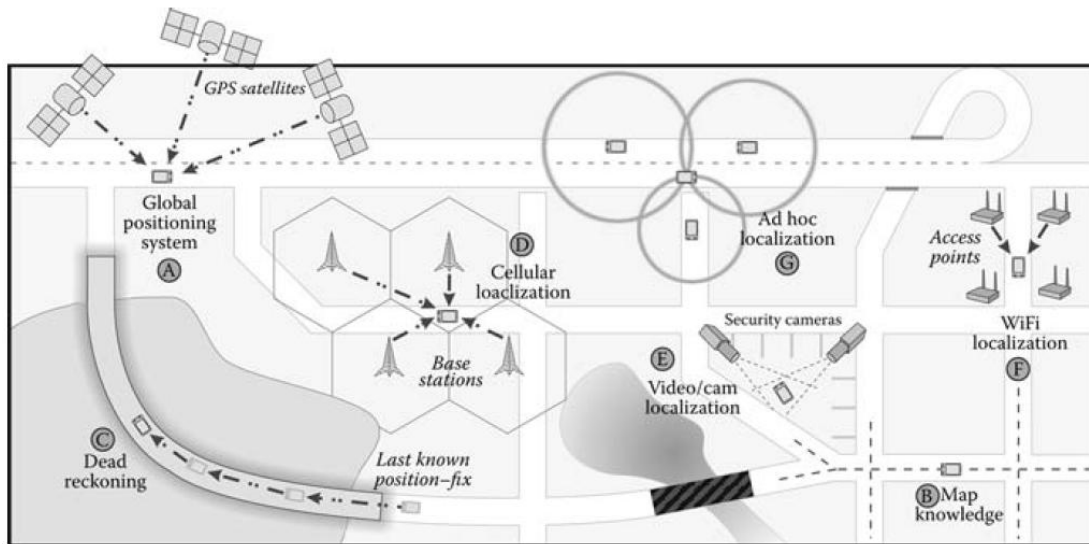


Figure II.5: Exemples des techniques de localisation appliquées dans VANET.

Afin de fonctionner correctement et de calculer sa position, un récepteur GPS doit avoir accès à au moins trois signaux satellite pour le positionnement bidimensionnelle (2D) et au moins quatre signaux satellite pour un calcul de position en trois dimensions (3D). D'une part, ce n'est pas un problème majeur, parce que le nombre de satellites visibles varie généralement entre quatre et onze. Cependant, le problème est que ces signaux sont facilement perturbés ou bloqués par des obstacles, y compris les bâtiments, les rochers, un feuillage dense, les interférences électroniques, et ainsi de suite. Le résultat est l'inexactitude de position ou l'indisponibilité dans les environnements urbains denses (canyons urbains), les tunnels, stationnements intérieurs, les forêts, et tout autre environnement à l'intérieur, sous-terre ou sous l'eau.

En outre, les récepteurs GPS ont une erreur de localisation de ± 10 à 30 m [K96]. Bien que ce soit un niveau raisonnable de précision pour la plupart des applications, il est certainement insuffisant pour les applications critiques dans VANET comme celles mentionnées dans la section précédente. Un aspect positif de ces erreurs est que les récepteurs GPS voisins ont tendance à avoir la même erreur de localisation orientée dans la même direction. En d'autres termes, les récepteurs GPS voisins possèdent des erreurs corrélées. Si nous mettons un GPS à un endroit déjà connu, ce récepteur GPS peut calculer sa position en utilisant les informations provenant des satellites et comparer la position calculée avec sa position connue. La différence

entre ces deux positions peut être diffusée et tous les récepteurs GPS du voisinage peuvent corriger leurs positions calculées en basant sur l'information différentielle diffusée. Cette technique est connue sous le nom de GPS différentiel (DGPS), et des stations de référence basées au sol sont utilisées pour diffuser cette information différentielle. L'utilisation du DGPS peut conduire à une précision inférieure à 1 mètre, ce qui est suffisant pour la plupart des applications critiques, mais il nécessite l'installation de stations de référence pour fonctionner.

En raison de ces limitations, en VANETs, les informations GPS ont besoin d'être combinées avec des différentes sources d'information de la position et / ou de la connaissance géographique [JSZ05]. Dans les sections suivantes, nous montrons plusieurs techniques qui peuvent être utilisés comme sources d'information afin d'améliorer la position de localisation par GPS ou à la remplacer complètement dans les endroits où le GPS n'est pas disponible.

II.8.2 Localisation par la carte géographique

Les progrès actuels dans les systèmes d'information géographique (GIS) ont permis la collecte et le stockage, ainsi que l'accès à des données géographiques très précises, même aux dispositifs les moins puissants. Cette technologie a été appliquée avec succès pour stocker des informations, sur les cartes des villes, dans des « systèmes de localisation par la carte » pour assurer la navigation des véhicules.

Mettant à part le fait que cette carte n'est pas une technique de localisation par elle-même, elle peut être utilisée pour améliorer la performance de plusieurs systèmes de positionnement, comme le GPS. Tout d'abord, en limitant les positions de véhicules estimés aux routes ou d'autres lieux possédants un accès aux véhicules, il est possible de diminuer les erreurs des positions estimées. Toutefois, la principale application de la carte de localisation est la technique de « correspondance cartographique » [JSZ05]. Dans cette technique, plusieurs positions obtenues sur des périodes de temps régulières peuvent être utilisées pour créer une trajectoire estimée. Cette trajectoire estimée est ensuite comparée à des données cartographiques numériques connues pour trouver le chemin géométrique le plus approprié dans la carte qui correspond à la trajectoire. En utilisant cette technique, les informations de position (par exemple, à partir du GPS) peuvent être représentées avec précision sur la carte.

II.8.3 Navigation à l'estime

En utilisant la navigation à l'estime [KF+06], la position actuelle d'un véhicule peut être calculée en basant sur sa dernière position connue et en utilisant des informations sur son mouvement telles que la direction, la vitesse, l'accélération, la distance, le temps, et ainsi de suite. La dernière position connue peut être obtenue, par exemple, en utilisant des récepteurs

GPS (qui sont les plus communs) ou en localisant une référence connue (les carrefours, les parcs de stationnement, une maison, et ainsi de suite) sur une carte numérique. Les informations de déplacement peuvent être obtenues par des capteurs dont les odomètres, tandis que la direction peut être estimée facilement en utilisant d'autres capteurs tels que les compas numériques et les gyroscopes.

Pratiquement dans les VANETs, la navigation à l'estime peut être utilisée seulement pour des courtes périodes d'indisponibilité du GPS, ou en combinaison avec les informations de la carte géographique. La raison d'éviter l'utilisation de cette technique sur de longues périodes de temps, c'est qu'elle peut facilement accumuler des erreurs. Par exemple, les erreurs de positionnement de 10 à 20 m peuvent être atteintes durant 30 secondes après la dernière position connue lors d'un voyage à environ 100 km/h [KKK05]. A cause que la navigation à l'estime accumule les erreurs rapidement dans le temps et la distance, elle est considérée comme un système de backup durant les périodes de coupure du GPS, par exemple lorsqu'un véhicule entre dans un tunnel et perd sa connexion GPS. Dans cet exemple, la dernière position calculée par le GPS est utilisée comme une position référence. Une autre application de la navigation à l'estime, comme indiqué ci-dessus, est de la combiner avec les informations de la carte numérique. Dans ces cas, les restrictions de la position peuvent être appliquées afin de réduire les erreurs causées par la navigation à l'estime, et les modèles de trafic peuvent être utilisés pour correspondre le chemin estimé à la trajectoire connue dans la carte (correspondance cartographique) [KHW88].

II.9 Trafic routier

Différentes approches peuvent être adoptées pour la modélisation des mouvements des véhicules. Toutes ces approches subissent un compromis entre la complexité et la précision. Une classification commune est alors basée sur le niveau du détail de la représentation du mouvement. Elle suit une approche largement employée dans d'autres domaines de recherche tels que la physique et l'économie, et elle fait la distinction entre trois niveaux d'analyse : macroscopique, mésoscopique, et microscopique. En conséquence, les modèles de mobilité peuvent être séparés selon les catégories suivantes :

- *Modèles macroscopiques*

Le trafic routier est considéré comme un flux continu. Les quantités considérées, comme la densité ou la vitesse moyenne des voitures, sont modélisées en utilisant souvent des formalismes empruntés de la théorie de la dynamique des fluides.

- *Modèles mésoscopiques*

Pour déterminer le mouvement des véhicules, les entités individuelles mobiles sont modélisées à un niveau agrégé, en exploitant les résultats de la théorie de la cinétique des gaz et aussi des files d'attente, ou les métriques macroscopiques telles que les relations entre la vitesse et la densité.

- *Modèles microscopiques*

Chaque mouvement de véhicule est représenté de façon très détaillée. Sa dynamique est traitée indépendamment de celles des autres voitures, à l'exception de celles qui sont assez près et ont un impact direct sur le comportement du conducteur. Les modèles microscopiques sont capables de reproduire des situations réelles et fines, comme des interactions à l'intérieur même de la voiture, le changement de voies, la fusion de flux, et les intersections. Les descriptions macroscopiques et mésoscopiques sont employées pour capturer la dynamique des systèmes véhiculaires à grande échelle, tels que celles qui se produisent sur les routes couvrant de vastes étendues (régions ou pays). En revanche, les modèles microscopiques, en raison de leur grand coût de calcul, sont généralement appliqués pour reproduire le trafic dans les petites régions, telles que les autoroutes ou les zones urbaines.

Cependant, la classification traditionnelle des modèles en macroscopiques, mésoscopiques, et microscopiques, devient de moins en moins utile lorsqu'on considère les modèles de mobilité des véhicules employés en simulation des réseaux.

Un autre classement meilleur peut être construit en faisant la différenciation de la nature des diverses représentations analytiques du mouvement des voitures, vues dans la littérature des réseaux véhiculaires :

- 1. Modèles stochastiques.** Le mouvement du véhicule est considéré au niveau microscopique et il est : (1) contraint sur un graphe représentant la topologie de la route, et (2) aléatoire, dans le sens où les entités mobiles suivent des chemins occasionnels sur le graphique et se déplacent à une vitesse aléatoire donnée. Les modèles stochastiques sont le moyen le plus naturel pour imiter la mobilité d'une voiture, et ils ont été introduits dès les premiers travaux sur les réseaux véhiculaires.
- 2. Modèles des flux de trafic routier.** La mobilité des véhicules est observée à un niveau élevé, et traitée comme un phénomène continu. Les modèles des flux de trafic déterminent les vitesses des voitures, en exploitant les relations fondamentales de l'hydrodynamique physique entre la vitesse, la densité, et l'écoulement d'un fluide. Ceci tombe dans la catégorie macroscopique ou mésoscopique déjà définies.

3. **Modèles du *car-following*.** Le comportement de chaque conducteur est calculé sur la base de l'état (position, vitesse et accélération) des véhicules voisins. Les modèles du *car-following* remontent aux années 1950, et représentent la façon la plus commune de décrire analytiquement la mobilité au niveau microscopique dans la théorie du flux de trafic.
4. **Modèles d'interaction des flux.** Ces flux caractérisent la dynamique de la fusion des flux de trafic, par exemple dans les rampes des autoroutes ou les intersections urbaines. Ils sont construits en se basant sur les représentations de l'interaction de la voiture provenant des modèles stochastiques et *car-following*. Ils tombent ainsi dans la catégorie microscopique.

II.10 Simulateurs des réseaux véhiculaires

Afin d'évaluer les réseaux VANETs, les chercheurs doivent presque toujours avoir recours à la simulation puisque les frais de déploiement réel sont trop élevés. Malheureusement, il n'y a pas de consensus sur un simulateur de réseaux véhiculaires.

Actuellement, la plupart des chercheurs génèrent des traces de mobilité en utilisant un simulateur de mobilité véhiculaire. Ces traces sont ensuite utilisées dans un simulateur de réseaux standard. Le choix du simulateur de mobilité est important comme les performances de réseaux véhiculaires dépendent fortement de la connectivité des nœuds, et la manière dans laquelle ces nœuds se déplacent affecte cette connectivité.

II.10.1 Types des simulateurs

Pour simuler les réseaux VANETs, il faut à la fois une composante de réseau et une composante de mobilité. Dans la plupart des cas, ces composantes sont fournies par deux simulateurs différents. Récemment, il y a eu des travaux sur le développement des simulateurs intégrés contenant à la fois des composantes réseau et mobilité, et permettant ainsi l'échange dynamique entre ces deux composantes (par exemple, TraNS [PR+08] et ASH [IW08]). Les simulateurs des réseaux véhiculaires peuvent être classés en deux types :

- **Les simulateurs faiblement intégrés** utilisent des simulateurs de réseaux et de mobilité séparés. Ceux de la mobilité génèrent les mouvements des véhicules et les enregistre dans des fichiers de trace. Le simulateur de réseau importe ces fichiers, mais il n'y a pas d'interaction directe entre les deux simulateurs.
- **Les simulateurs fortement intégrés** n'utilisent pas de fichiers de trace mais plutôt intègrent la mobilité et le réseau dans un seul simulateur. Dans certains cas, le modèle de

mobilité et celui du réseau peuvent communiquer, produisant un feedback du simulateur de réseau pour régler les paramètres du mouvement des véhicules. Par exemple, dans des systèmes de notification de la congestion du trafic, la réception de certains messages réseaux peut obliger un véhicule de changer son chemin (par exemple, prendre une sortie précoce). Dans les systèmes de prévention des accidents, les messages réseaux peuvent obliger le véhicule à ralentir pour éviter un accident. Ce type de retour n'est pas soutenu par les simulateurs réseaux.

II.10.1.1 *Simulateurs de mobilité*

Pour la plupart des études VANET qui se concentrent sur la communication entre les véhicules individuels, le niveau le plus approprié de mobilité est microscopique. Ce niveau décrit le trafic en basant sur le comportement des véhicules individuels.

On présente ainsi plusieurs simulateurs de mobilité microscopique des véhicules. Certains sont commerciaux et d'autres sont gratuits. *TSIS-CORSIM* (*Traffic Soft ware Integrated System-Corridor Simulation*), *VISSIM*, *PARAMICS*, *SmartAHS*, *Microscopic Traffic Applet*, *CanuMobiSim* and *VanetMobiSim*, *SUMO* (*Simulation of Urban Mobility*) sont quelques exemples de simulateurs.

II.10.1.2 *Simulateurs réseaux*

Quelques exemples de simulateurs réseaux: OPNET, GloMoSim and QualNet, ns-2 / ns-3, J-Sim, OMNeT++, SWANS (Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator)

II.10.1.3 *Simulateurs fortement intégrés*

Le problème ici est de savoir comment fusionner les deux types de simulateurs (simulateur de réseau et de la mobilité).

Une méthode simple pour réaliser cette fusion et de créer un simulateur fermement intégré est d'implanter les modèles de mobilité dans un simulateur de réseau, mais sans permettre aux messages-réseau de faire une interaction avec le modèle de mobilité. Ce type de simulation est appelé communication unidirectionnelle (du modèle de mobilité au modèle de réseau). Ces types de simulateurs sont appropriés pour simuler les applications VANET reliées à l'*infotainment*, y compris la connectivité internet, les applications multimédias et les applications peer-to-peer, où la communication n'affecte par les mouvements des véhicules.

En revanche, les simulateurs fortement intégrés, qui offrent une communication bidirectionnelle, sont généralement constitués de deux sous-simulateurs (réseau et mobilité) qui

peuvent communiquer entre eux. Ces simulateurs sont plus appropriés pour les applications de sécurité routière et d'informations sur le trafic, et supposent que le feedback du réseau affecte les mouvements des véhicules. Dans ces types d'applications, le simulateur de trafic alimente le simulateur de réseau avec des informations sur la position, la vitesse, l'accélération, la direction, et ainsi de suite.

En général, chaque simulateur possède une file d'attente pour stocker les événements qui doivent être exécutés en fonction de leur temps d'exécution. Dans le cas de communication bidirectionnelle, chaque sous-simulateur possède sa propre file d'attente. Ces deux files d'attente peuvent être combinées en une seule file, ou elles peuvent être séparées, ce qui implique qu'une complexité supplémentaire sera nécessaire pour la synchronisation. En se basant sur cette décision, les simulateurs à communication bidirectionnelle sont séparés en deux catégories : ceux qui ont une seule file d'attente des événements, et ceux avec deux files d'attente.

- *NCTUns – EstiNet*

NCTUns (National Chiao Tung University Network Simulation) [NNS6] implante une communication bidirectionnelle avec une seule file d'attente d'événements. NCTUns 1.0 a été développé uniquement comme un simulateur de réseau, mais la version la plus récente, NCTUns 6.0, intègre plusieurs capacités de simulation du trafic, tels que la conception des cartes et le contrôle de la mobilité des véhicules. Une grande variété de cartes peut être conçue en utilisant différents types de segments routiers supportés (par exemple, routes à seule voie, routes à plusieurs voies, carrefours, routes en forme de T et fusion des voies). NCTUns comprend aussi une interface graphique pour aider dans le processus de la conception des cartes. Le mouvement des véhicules dispose de deux modes, préétablis et pilotage automatique. Dans le premier mode de déplacement, le chemin d'accès et la vitesse de chaque véhicule sont définis par le concepteur du scénario. En mode pilotage automatique, le concepteur du scénario spécifie les paramètres suivants pour chaque véhicule : la vitesse initiale, la vitesse maximale, accélération initiale, l'accélération maximale, la décélération maximale, et ainsi de suite.

EstiNet 7.0 [EST11] est un logiciel pour la planification des réseaux, le test, les applications pédagogiques, le développement des protocoles, et la prédiction des performances des applications. C'est à la fois un simulateur et un émulateur de réseau, utile pour étudier le *cloud computing* et divers réseaux de la prochaine génération. Actuellement, il s'exécute sur le système d'exploitation Linux et y compris la dernière version de Fedora 16 Linux. EstiNet 7.0 est la version commerciale de NCTUns, simulateur et émulateur de réseau.

SWANS++, GrooveNet, TraNS, Veins (Vehicles in Network Simulation), ASH (Application-aware SWANS with Highway mobility) sont d'autres exemples de simulateurs. La Table II.I montre une comparaison faite par [MT⁺09], entre quatre simulateurs utilisés pour les réseaux VANET.

Table II.I. Une comparaison de quelques simulateurs VANET

	TraNS	GrooveNet	NCTUns	MobiReal
Générateur de mobilité	SUMO	GrooveNet	NCTUns	MobiReal
Simulateur réseaux	Ns-2			basé sur GTNetS
Modèles de mobilité	chemin aléatoires et manuels	Waypoints aléatoires, origine-destination explicite ou distribuée	chemin aléatoires et manuels	basant sur des règles probabilistes
Type de simulation		Microscopique, continue en espace, et discrète en temps		
Modèles de voie		Rue à multivoies avec changement de voie		
Modèles de vitesse	Vitesse de la rue	Uniforme, vitesse de la rue, modèle de Markov, basé sur la charge	Aléatoire	Vitesse de la rue
Modèle du flux de trafic	Car following, Approche DUA pour l'affectation du trafic		Car following	
Topologie de la route	Toute	Toute	Définie par l'utilisateur, générée automatiquement sur les intersections	Définie manuellement
Modèle d'intersection	Règles du droit de passage basées-jonction,	Géré par le feu de circulation	Gere par 4 couleurs de feu de circulation	Règles du droit de passage, et géré par le feu de circulation
Modèle du parcours	Aléatoire, définie manuellement	Dijkstra, sightseeing	Définie manuellement	Définie manuellement
Protocoles VANET	802.11p Applications VANET : Alerte du danger sur la route, recharger la route dynamiquement testée pour 3000 véhicules	Communications V2V, V2I, multiples types de messages pour informer périodiquement les voisins sur la position du véhicule et cas d'urgence	802.11p, multiples interfaces au même temps, Contrôle du pilotage	Conçu initialement pour les MANETs

Facilité d'installation	Moyenne	Moyenne	Difficile	Facile
Facilité d'utilisation	Moyenne	Difficile	Difficile	Difficile
Notes	Intègre deux simulateurs réseau et trafic. Les informations échangées par les protocoles de communications peuvent altérer le comportement du véhicule dans le modèle de mobilité	Peut assurer des simulations hybrides (communication entre les véhicules simules et les véhicules réels sur la route)	Assure l'intégration transparente d'émulateur et simulateurs, besoin du SO Fedora9.	Simule une mobilité réelle des hommes et véhicules, leur comportement peut être changé selon du contexte d'une application donné.

Actuellement, aucun simulateur ne se démarque pour évaluer les réseaux véhiculaires. Le plus souvent, les chercheurs ont combiné les simulateurs de mobilité existants avec ceux du réseau. Les traces de mobilité sont générées puis passées au simulateur de réseau. Les nouveaux développements dans des simulateurs pour assurer l'échange dynamique entre les modèles de mobilité et les modèles de réseau, aident les chercheurs à mieux évaluer leurs systèmes émergents. L'EsitNet (avant, le NCTUns) est l'un de ces simulateurs.

II.11 Couche physique du DSRC

II.11.1 Architecture de la couche physique.

Le protocole DSRC PHY est défini dans la norme IEEE 802.11 [ITS98] (en particulier l'article 17), telle que modifiée par la norme IEEE 802.11p [C2C]. Il est divisé en deux sous-couches: la PMD (Physical Medium Dependent) et la procédure de convergence de la couche physique (*physical layer convergence procedure* ou PLCP).

Comme son nom l'indique, la sous-couche PMD s'interface directement avec le support sans fil. Elle utilise la technique de multiplexage OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), ajoutée à l'origine de la norme 802.11 par l'amendement 802.11a.

Le PLCP définit la mise en correspondance entre la trame MAC et l'unité de données de la couche PHY : le symbole OFDM. En 2003 une version antérieure de la couche PHY du DSRC a été publiée sous les auspices de l'ASTM International dans la norme ASTM E2213-03 [DSRCR03] qui a également été basée sur la norme IEEE 802.11. En 2004, les parties intéressées ont obtenu l'approbation pour créer l'amendement IEEE WAVE 802.11p pour DSRC dans la norme IEEE 802.1 Working Group (WG).

La modification a été publiée en 2010. Les écarts par rapport à la principale norme 802.11 ont été minimisés afin d'encourager les fournisseurs de silicium 802.11 à supporter le 802.11p, ce qui

aiderait à réduire les coûts en tirant parti de l'important volume de puces 802.11 produites annuellement.

Le groupe de travail (WG) IEEE 802.11 intègre périodiquement ses amendements dans une nouvelle norme de base. Il a entrepris cette intégration pour toutes les modifications effectuées depuis l'effort d'intégration en 2007. La norme intégrée sera dénommée 802.11-2012 si elle est publiée comme prévu en 2012. À ce point, l'amendement 802.11p n'existera plus en tant que document distinct, mais les fonctionnalités qu'il a ajoutées à la norme de base restent encore référées comme 802.11p. Il est également possible que dans le processus d'intégration, des modifications mineures seront apportées aux capacités du WAVE décrits ci-après.

II.11.2 Technologies de la couche Physique

La couche inférieure de l'IEEE 802.11p est la norme de base pour la norme DSRC (Dedicated Short Range Communications), ce qui implique la communication véhicule à véhicule ou infrastructure. La répartition des fréquences aux États-Unis (5,850-5,925 GHz) a été faite à partir de 2004, tandis qu'en Europe, le DSRC a été adopté en Août 2008 avec la bande de fréquence dans la gamme de 5,875-5,905 GHz [C2C].

Actuellement, le nouveau groupe formé, Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE), travaille sur la migration des normes IEEE 802.11 vers le 802.11p [MC07, ME05].

Le groupe d'étude WAVE travaille sur plusieurs normes. L'IEEE P1609.3 qui spécifie l'architecture globale de communication, l'IEEE 802.11p, IEEE P1609.1, IEEE P1609.4, IEEE P1609.2 qui met l'accent sur l'architecture plus en détails. La couche PHY 802.11p suit la même structure de trame, ainsi que pour la modulation et les séquences conducteurs de la couche PHY IEEE 802.11a [MC07- YEY+04].

En comparaison avec les communications cellulaires, le DSRC peut fournir des taux de transfert très élevés et des petites latences de communication pour des petites zones de communication définies par le rayon de communication de la technologie [XSJ]. Il va assurer la communication entre les nœuds qui se déplacent avec une vitesse allant jusqu'à 200 kilomètres par heure [802P - EGH+06].

La couche physique du DSRC utilise la technique de multiplexage à division de fréquence orthogonale (OFDM) pour multiplexer les données [MC07- YEY+04]. Cette technologie fonctionne en divisant le signal radio en plusieurs sous-signaux. Ces sous-porteuses généralement se chevauchent en fréquence, mais sont conçues pour ne pas interférer les unes avec les autres. Les sous-porteuses sont orthogonales les unes aux autres et sont séparées en utilisant une

transformée de Fourier rapide (FFT). Les principales raisons à l'utilisation de l'OFDM sont son efficacité spectrale élevée [YFY+04], ses bonnes performances dans des environnements à signaux multitrajets, et une conception simple des émetteurs-récepteurs.

A côté de la réduction des interférences par trajets multiples, on peut augmenter la puissance du signal par le traitement des paquets réfléchis pour augmenter le gain. Cette technique améliore également la livraison hors vue (NLOS) (où l'émetteur et le récepteur ne se voient pas l'un l'autre). L'OFDM divise le flux de données d'entrée en un ensemble de trains de bits parallèles, et chaque train de bits est ensuite mis en correspondance avec un ensemble de sous-porteuses orthogonales chevauchées entre elles pour la modulation et la démodulation des données.

II.11.3 Spectre DSRC

La FCC a alloué le spectre à partir de 5,850 GHz à 5,925 GHz (la bande 5.9 GHz), pour l'opération du DSRC aux États-Unis [ITS98], [DSRCR03]. Ce spectre est divisé en sept canaux de 10 MHz avec une bande de garde de 5 MHz à l'extrémité inférieure, comme illustré dans la Figure II.6. Les paires de canaux de 10 MHz peuvent également être combinés en un canal de 20 MHz.

L'essai de DSRC aux États-Unis a mis l'accent sur les canaux de 10 MHz, afin de maintenir de nombreux types d'applications en parallèles. Également, les tests physiques suggèrent que cette largeur de bande est bien adaptée aux écarts du délai et du Doppler, susceptibles d'être rencontrés dans l'environnement véhiculaire [BSK10].

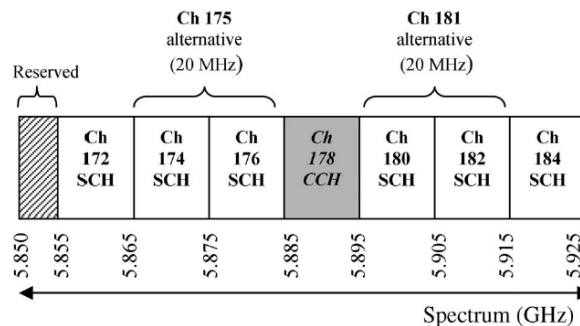


Figure II.6: Désignations du plan des canaux DSRC en US [HL10]

Une trame, avec sa modulation et de codage (Table II.II), prend sur un canal 20 MHz environ la moitié du temps de transmission par rapport à sur un canal 10 MHz, ainsi cela réduit la probabilité de collision pour un nombre donné de transmissions de trames par seconde.

Table II.II Options des débits de données dans un canal DSRC 10 MHz OFDM

Technique de Modulation	Taux de Bits codés (Mbps)	Taux de codage	Débit de données (Mbps)	Bits par symbole OFDM
BPSK	6	1/2	3	24
BPSK	6	3/4	4.5	36
QPSK	12	1/2	6	48
QPSK	12	3/4	9	72
16-QAM	24	1/2	12	96
16-QAM	24	3/4	18	144
64-QAM	36	2/3	24	192
64-QAM	36	3/4	27	216

De plus, un canal de 20 MHz est plus bruité pour une densité spectrale donnée, et risque de présenter des problèmes dans certains environnements, comme par exemple, l'interférence entre symboles due à une propagation à retard qui dépasse la longueur raccourcie du préfixe cyclique.

La FCC a également désigné chaque canal soit comme un canal de service (SCH) ou comme un canal de contrôle (CCH). L'amendement d'IEEE 802.11p spécifie explicitement l'utilisation d'OFDM dans la bande des 5,9 GHz des États-Unis, ainsi que dans la même bande pour l'utilisation en Europe.

Dans la Table II.III, des spécifications pour certaines normes du standard 802.11 [802P, ME05] sont présentées. La portée de transmission peut aller au delà des valeurs ci-dessus, au détriment de la bande passante (par exemple, le 802.11a peut supporter jusqu'à 350 m, mais à 6 Mbit / s) [MOR02].

Table II.III Spécifications du standard IEEE 802.11

Standards Wi-Fi	Modulation	Fréquence [GHz]	Bande Passante [MHz]	Nb. de tous/canaux non-chevauchés	Bande Passante (max) [Mbit/s]	Couverture de transmission (outdoor) [m]
802.11a	OFDM	5.725-5.850	20	12/8	54	30
802.11b	DSSS	2.400-2.485	22	14/3	11	250
802.11g	OFDM	2.400-2.483	22	14/3	54	250
802.11p US	OFDM	5.850-5.925	10 (20)	7/7	54	1000
802.11p EU	OFDM	5.875-5.905	10	7	54	1000

II.11.4 Résumé

Les caractéristiques techniques du DSRC aux États-Unis sont [MC07, ZR03, VII05]:

- Bande passante: 75 MHz (5850 - 5925 GHz).
- Canal de garde: 5 MHz réservée à l'extrémité inférieure.
- Canaux: 7 canaux de 10 MHz sans chevauchement. Les canaux sont:
 - Le canal de contrôle (178) qui est principalement utilisé pour diffuser des données liées à la sécurité routière seulement, et l'échange de données non-urgentes est strictement limité au temps de transmission et l'intervalle de temps.
 - Le canal véhicule à véhicule (172) et le canal véhicule-à-route ou canal d'intersection (184) sont utilisés pour des applications dédiées à la sécurité routière (différente du canal de contrôle).
 - Les quatre autres canaux de service (174, 176, 180, 182), qui peuvent être combinés dans les canaux de 2 à 20 MHz, sont utilisés pour partagés des applications liées à la sécurité routière.
- Modulation: BPSK OFDM, QPSK OFDM, 16-QAM OFDM, 64-QAM OFDM.

Les 128 premiers bits sont toujours codés en BPSK. Selon [MC07], QPSK offre une meilleure performance par rapport au BPSK et 16-QAM OFDM pour toutes les tailles de paquets.

- Les taux de codage: 1/2, 2/3, 3/4.
- Les sous-porteuses: 64 (dont seulement 52 sous-porteuses sont effectivement utilisées pour la transmission du signal).
- Durée du symbole OFDM : 8,0 μ s.
- Débit de données: 6, 9, 12, 18, 24 et 27 Mbps avec des canaux de 10 MHz (3 Mbps de préambule) ou 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 et 54 Mbps avec des canaux de 20 MHz comme option (6 Mbps pour le préambule).
- Puissance (couverture): généralement moins de 33 dBm (2 W), mais elle peut atteindre 44,8dBm (30 W) pour les applications de sécurité routière publique sur le canal de contrôle qui, théoriquement, permettent de diffuser des messages de sécurité routière jusqu'à 1000 m. Seuls le canal de contrôle (44,8 dBm) et le canal d'intersection (40 dBm) sont utilisés pour une longue distance jusqu'à 1,000m.

Les autres canaux sont utilisés pour des distances allant jusqu'à 330 m (prévention des accidents, l'état des routes). La puissance devrait être ajustée en fonction de la vitesse des

véhicules afin de minimiser les interférences. Les antennes sont nécessaires. Elles peuvent être montés sur le toit du véhicule afin d'obtenir un motif horizontal de 360° et être dans le «centre» du véhicule pour permettre des communications équidistantes. Notons qu'en Europe, la teneur maximale totale de la puissance d'émission est limitée à 33 dBm.

Les composants matériels utilisés dans la communication des véhicules sont composés d'un OBU (Unités embarquées - OnBoard Units), UAR (unités routières- RoadSide Units) et d'antennes omnidirectionnelles avec aussi des capteurs.

II.12 Couche de liaison de données du DSRC (*Data Link Layer*)

Comme la couche PHY, la couche liaison de données (*Data Link Layer*) est généralement divisée en sous-couches. Le contrôle d'accès au support (MAC) est la sous-couche inférieure qui définit les règles selon lesquelles les stations (STA) partagent le support sans fil. La sous-couche supérieure est celle de contrôle de la liaison logique (LLC). Les sous-couches de liaison de données DSRC sont décrites dans les sections suivantes qui suivent.

II.12.1 Sous-couche de Contrôle d'accès au support (MAC)

Le but de la sous-couche MAC est d'établir des règles pour l'accès au support commun, de sorte qu'il peut être partagé efficacement et équitablement parmi un ensemble de stations (STAs). Les règles IEEE 802.11 se divisent en deux catégories: les règles basées sur la session qui définissent les étapes que le véhicule doit prendre avant qu'il ne soit autorisé à communiquer des informations via la couche 3, et les règles pour une transmission individuelle trame par trame. L'amendement de la norme IEEE 802.11p [IEP610] apporte des modifications importantes aux règles basées sur la session, par contre les règles de trame par trame sont utilisées telles qu'elles sont définies dans la norme IEEE 802.11 [IE117].

II.12.1.1 Règles basées sur la session

La norme 802.11 définit un concept appelé Basic Service Set (BSS). Le BSS est un ensemble de STAs qui acceptent d'échanger des données. Il existe deux types de BSS: à infrastructure et indépendant (Figure II.7).

Le **BSS à infrastructure** est le plus fréquent. Il dispose d'un Point d'accès (AP) STA spécial qui annonce le BSS, et établit certains paramètres et contraintes pour l'utilisation du BSS. L'AP sert de passerelle vers un système de distribution (DS) qui fournit l'accès aux autres réseaux liés au réseau sans fil (WLAN), par exemple le réseau internet. Une STA, avant qu'elle puisse transmettre des données à l'AP, doit écouter les annonces du BSS, dans une balise ou

dans une trame de réponse, puis elle va passer par une série d'étapes d'initialisation: Adhésion (*Joining*) (en incluant la synchronisation avec l'horloge de l'AP), Authentification et Association.

Le *BSS indépendant* n'a aucun AP pour fournir une connectivité backhaul et les STAs interagissent directement comme des pairs. Ces STAs assument la responsabilité d'annoncer l'existence du BSS avec ses paramètres d'une manière collective. La communication au sein d'un BSS indépendant nécessite qu'elle soit premièrement annoncée via une balise, et que les autres STAs se synchronisent avec la STA, émettrice de cette annonce.

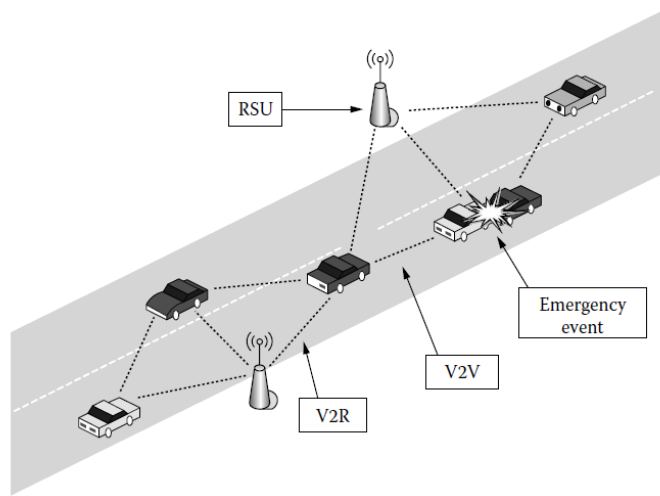


Figure II.7: Communications entre les véhicules avec et sans infrastructure.

Les délais pris pour suivre les étapes de configuration décrites ci-dessus, en particulier dans le cas de communication via un AP, peuvent augmenter la complexité dans DSRC. Dans des environnements véhiculaires de grande mobilité, la possibilité de communiquer peut être fugitive, ne durant que quelques secondes. Il y a donc une volonté de définir des règles d'accès au support plus « légers ».

Cette volonté est en fait la principale motivation pour l'amendement du 802.11p WAVE. Cet effort conduit à la définition d'un nouveau type de communication 802.11 "en dehors du contexte d'un BSS" (OCB). Dans le standard 802.11 traditionnel, toutes les trames de données sont envoyées entre les STAs qui appartiennent au même BSS. Par contre, la communication des trames de données OCB est limitée entre les STAs qui n'appartiennent pas à un BSS. Il n'y a pas besoin d'une configuration MAC requise avant que les STAs échangent leurs trames de données OCB.

L'en-tête de trame 802.11 contient un champ de 6 octets pour l'identificateur BSS (BSSID). Chaque STA, en envoyant sa balise, attribue un identificateur au BSS, par exemple dans un BSS à infrastructure, le BSSID est l'adresse MAC du point d'accès (AP). Chaque trame envoyée dans le cadre d'un BSS contient dans son en-tête l'identificateur BSS. Le champ du BSSID d'une trame OCB envoyée est fixé chaque seconde, i.e., 0xFFFFFFFF en notation hexadécimale, qui est appelée la valeur générique (*wildcard value*). Le but du BSSID est de permettre à un récepteur de distinguer facilement les trames qui devraient être prises des trames qui devraient être ignorées.

Un récepteur avec la capacité OCB activée permet à la couche MAC de passer n'importe quelle trame de données portant la valeur générique dans le champ BSSID, et d'ignorer toute trame de données envoyée par une STA dans un BSS coexistant et qui ne possède pas la valeur générique dans le BSSID.

Une trame de données envoyée par OCB peut transporter une seule destination (unicast) ou un groupe de destinations (multidiffusion ou diffusion). Le message de sécurité routière de base (*Basic Safety Message*) est généralement encapsulé dans le message WAVE court (WAVE short message ou WSM - voir section suivante) et ensuite envoyé par OCB à l'adresse de destination de diffusion. L'amendement IEEE 802.11p introduit une nouvelle trame de gestion, la trame d'annonce du timing (TA), qui peut être utilisée pour annoncer des informations sur la source de temps de l'émetteur (*time source*).

La sous-couche MAC possède quelques règles régissant la communication OCB. La plus importante est qu'une STA ne peut pas engager de communication OCB si elle appartient à un BSS. En particulier, la communication ne fait pas :

- L'utilisation d'une trame de balise;
- La synchronisation entre deux STAs avant qu'ils puissent communiquer;
- L'utilisation de l'authentification au niveau de la sous-couche MAC, ou de l'association entre les STAs avant leur communication.

Voici quelques raisons pour lesquelles ces omissions sont acceptables dans l'environnement véhiculaire.

Manque de balise (*Lack of beacon*) : La balise 802.11 annonce périodiquement l'existence d'un BSS, et transporte des paramètres importants y compris le BSSID pour un bon fonctionnement.

Le type de communication OCB n'utilise pas de BSS, et donc il n'a pas besoin de la plupart de contenu des balises (voir [IE117, onglets. 7 et 8]). Cependant, certaines balises contenant des

informations sur les débits de données pris en charge ou sur les paramètres de la qualité de service (QoS), sont pertinentes et il est important de les spécifier comme nécessaires pour la communication OCB.

Ceci peut être fait au sein de l'amendement 802.11p (par exemple, il spécifie un ensemble de paramètres de QoS distincts pour la communication OCB), ou dans une autre norme (par exemple, SAE J2945.1), ou via une communication de couche supérieure ou un plan de gestion de communication (par exemple, la trame VSA portant un WSA défini dans la norme IEEE 1609.3 peut transmettre des informations sur les taux de transfert de données).

Synchronisation : La synchronisation au niveau MAC entre les STAs est principalement utilisée au sein d'un BSS pour faciliter la gestion de la puissance par laquelle une STA peut alterner entre les états « éveillé » et « demi-sommeil ». Les périphériques DSRC ont souvent un accès suffisant à l'énergie et peuvent écouter un canal en permanence, la gestion de puissance n'est donc pas utilisée avec la communication OCB, et la synchronisation MAC n'est pas nécessaire. Les véhicules engagés en communication V2V (véhicule-à-véhicule) sont supposés avoir le GPS pour le positionnement, sont donc intrinsèquement synchronisés au niveau de la couche application. Un dispositif sans GPS peut être synchronisé via la réception d'une trame TA.

Authentication : Comme pour la synchronisation, la nécessité pour l'authentification dans une communication OCB est déterminée au niveau des couches supérieures. Dans le modèle DSRC, un moyen d'authentification des messages est assuré par la norme IEEE 1609.2 [IE2D9]. Cette méthode est préférable à celle qui est définie dans 802.11 pour plus d'efficacité et de confidentialité. La communication OCB qui utilise IPv6 plutôt que les couches supérieures du 1609, peuvent utiliser une variété de techniques établies pour l'authentification.

Association : L'association des STAs dans une infrastructure BSS a pour but d'aider l'AP à faire un pont entre les trames d'une STA non-AP dans le BSS et un nœud de l'autre côté du DS (Distribution System). Les messages V2V n'ont pas besoin du *bridging*. De nombreux autres messages DSRC (V2V ou entre un véhicule et un RSU) atteignent leur destination en un seul saut. Un transfert multisaut, à l'aide d'un RSU comme nœud intermédiaire entre un véhicule et un serveur, peut être atteint par le routage de la couche 3 (par exemple, l'utilisation d'IPv6) ou par le *bridging* si l'adresse de transfert est fournie par d'autres moyens (par exemple, trame de gestion, configuration). La communication OCB est seulement utilisée sur le lien sans fil entre le véhicule et le RSU. Le transfert multisaut dépasse le périmètre de la norme IEEE 802.11 pour la communication OCB.

En résumé, les fonctions traditionnels du 802.11 : le balisage, la synchronisation, l'authentification et l'association, ne sont pas nécessaires au niveau MAC pour une communication OCB. La trame TA propose une alternative plus légère de synchronisation pour la balise. Les autres fonctions sont éventuellement implémentées au niveau des couches supérieures, soit dans le cadre d'une norme distincte ou par des moyens propriétaires.

II.12.1.2 Règles d'accès au support

La norme IEEE 802.11 définit un ensemble de règles qui permettent aux STAs de partager efficacement le support sans fil. Dans ce qui suit, on résume les points les plus importants. L'IEEE 802.11p ne modifie pas ces règles. Il les applique identiquement aux trames envoyées au sein et en dehors du contexte d'un BSS. Le paradigme essentiel de l'IEEE 802.11 est le CSMA/CA ou « *carrier sense multiple access/collision avoidance* ».

Le scénario le plus simple pour une communication sous le CSMA/CA est comme suit :

Une STA qui possède une trame à envoyer détecte d'abord le support sans fil :

- a) Si le support est libre, la STA commence la transmission de ses trames.
- b) Si le support est occupé, la STA déclenche un *backoff* aléatoire en choisissant un certain nombre de slots de temps à attendre avant la transmission. Le compte à rebours commence lorsque le médium devient inoccupé. Il est interrompu pendant tout intervalle de temps non libre, et reprend le compte à rebours lorsque le support devient libre. L'émetteur d'une trame unicast attend un accusé de réception (ACK) de la part du récepteur. S'il ne reçoit pas l'accusé dans un délai de temps, il retransmet la trame après avoir attendu un autre temps de *backoff* aléatoire. Une trame envoyée à une groupe d'adresses n'est pas acquittée et elle n'est envoyée qu'une seule fois.

Le mécanisme « *Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)* » pour la QoS [IE117] fournit différentes priorités de l'accès sans fil principalement à travers la sélection des paramètres de la période d'écoute (*idle time*) et du temps de *backoff* paramètres de plage.

II.12.1.3 Format de la trame MAC 802.11

Chaque trame MAC 802.11 se compose d'un en-tête, corps de la trame, et une séquence de contrôle de trame (FCS). Le corps est transmis à la sous-couche MAC de la couche supérieure ou du plan de gestion (*management plane*). L'en-tête de trame peut avoir une variété de formats selon le type de la trame (contrôle, données, gestion). Le format le plus commun de la trame est illustré à la Figure II.8 et brièvement résumé ici.

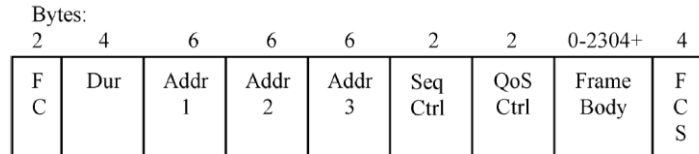


Figure II.8: Format de la trame 802.11

Le champ de contrôle de la trame (indiqué comme *FC* dans la figure) comprend la version du protocole, le type et le sous-type de la trame, et plusieurs autres champs de bits.

Le champ de la durée (*Dur* dans la figure) indique la durée temporelle de la trame. Pour une trame envoyée par une communication OCB, les adresses 1, 2 et 3 contiennent respectivement l'adresse MAC de l'appareil d'émission, l'adresse MAC du périphérique de destination, et le BSSID générique.

Le champ de séquence de contrôle de trame (*FCS* dans la figure) transporte un code cyclique redondant (*Cyclic Redundancy Code* ou CRC) de 4 octets, calculé pour l'en-tête et le corps de trame, et est utilisé pour détecter les erreurs sur les bits.

II.12.2 Sous-couche de contrôle de la liaison logique (LLC)

La sous-couche LLC de la pile du protocole DSRC utilise la norme IEEE 802.2 [IE298] reliée avec le protocole SNAP (*Subnetwork access protocol*) [IE202]. IEEE 1609.3 nécessite le support du service (Type 1) sans acquittement et non orienté connexion de la LLC, avec les trames des informations non numérotées (*Unnumbered Information - UI*).

Avec LLC SNAP [PR88], le protocole associé avec la payload LLC est indiqué par le champ *EtherType*. Dans le DSRC, les deux valeurs reconnues du *EtherType* sont 0x88DC (WAVE Short Message Protocol) et 0x86DD (IPv6). La Figure II.9 montre le format de la PDU (*Protocol Data Unit*) du LLC pour DSRC, y compris la sous-couche LLC et les en-têtes du SNAP.

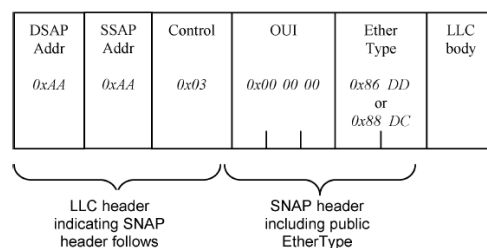


Figure II.9: Format de la trame 802.2 LLC utilisée en DSRC

II.13 Couches DSRC moyennes (*Middle Layers*)

Dans l'architecture qui spécifie la partie intermédiaire de la pile de protocoles DSRC, tel qu'envisagée par l'IEEE 1609 WG, trois fonctions principales sont couvertes : le fonctionnement multicanal (IEEE 1609.4 [IE410]), les services réseaux (IEEE 1609.3 [IE310]), et les services de sécurité routière (IEEE 1609.2 [IE2D9]).

L'architecture de la norme IEEE 1609 (voir IEEE 1609.0 [IE010]) généralise la sous-couche MAC de la Figure II.10 par un ensemble d'une ou de plusieurs instances de la couche MAC IEEE 802.11p définie ci-dessus, avec un protocole de commutation du canal qui définit comment un périphérique peut fonctionner efficacement sur un canal à la fois parmi plusieurs canaux DSRC. Ce concept de fonctionnement multicanaux [IE410] est décrit plus en détail ci-dessous.

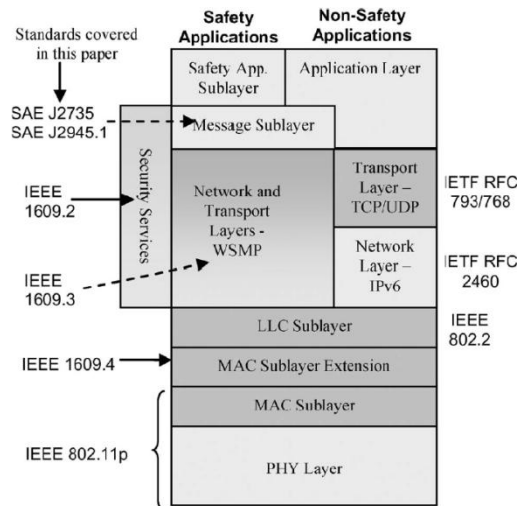


Figure II.10: Architecture des couches du DSRC en US (IETF RFC 768)

Comme illustré dans la Figure II.10, la pile de protocoles DSRC se divise en deux branches au-dessus de la sous-couche LLC. La première utilise le *WAVE Short Message Protocol* (WSMP) défini dans la norme IEEE 1609.3 [IE310], et qui est optimisé pour les échanges des données sans routage et sont communs dans les réseaux véhiculaires, par exemple, les messages de sécurité routière V2V. La deuxième utilise les protocoles internet traditionnels, principalement IPv6, UDP et TCP. En général, un service peut choisir d'exécuter sur WSMP ou IPv6, selon ses besoins. En plus, l'IEEE 1609.3 définit l'annonce du service WAVE (*WAVE Service Advertisement* ou WSA).

La sécurité routière est la troisième grande fonction définie au sein de l'IEEE 1609. La norme IEEE 1609.2 [IE2D9] définit des protocoles d'authentification et de chiffrement de messages. IEEE 1609.3 et 1609.4 ont été publiés en décembre 2010, IEEE 1609.2 en 2011.

A coté des normes IEEE 1609.2, 1609.3, 1609.4, le groupe IEEE 1609 WG travaille encore sur les normes suivantes :

- IEEE 1609.1- assure la gestion de ressources à distance (par exemple, des simples dispositifs WAVE);
- IEEE 1609.11- assure des services de sécurité pour le paiement électronique (le télépéage) ;
- IEEE 1609.12- définit trois valeurs d'allocation de PSID (Provider Service ID) pour que le récepteur peut distinguer les trois différentes classes de BSM;

Dans ce qui suit, on s'intéresse à la norme IEEE 1609.4 qui décrit le fonctionnement multicanaux (*multichannel operation*) dans MAC IEEE 802.11p.

II.13.1 IEEE 1609.4: Extension MAC pour des opérations multicanaux

L'IEEE 1609.4 est applicable lorsque le DSRC fonctionne dans un environnement multicanal (aux États-Unis à 5,9 GHz). Les réglementations DSRC européennes demandent au moins deux canaux et peut-être plus. L'IEEE 1609.4 définit une extension de gestion pour la couche MAC, qui permet de se déplacer entre les canaux d'une façon efficace. Il est mieux décrit comme une extension de la couche MAC, avec une autre instance logique MAC IEEE 802.11p exécutée sur chaque canal. Le but d'IEEE 1609.4 est de définir un mécanisme par lequel les appareils qui se déplacent parmi plusieurs canaux peuvent se retrouver ensemble, c'est-à-dire s'accorder sur le même canal en même temps pour qu'ils puissent communiquer. Le problème est surtout important pour les périphériques qui ont une seule radio. Deux concepts sont utilisés: le canal CCH et la division temporelle (*time division*).

- Le concept du CCH utilise un seul canal (Ch. 178 aux US) adopté comme "rendez-vous" que les périphériques écoutent périodiquement. Tous les autres canaux de la bande sont désignés comme canaux de service (SCH).
- Le concept de division temporelle suppose que tous les périphériques ont accès au temps universel coordonné (UTC) qui peut être reçu à partir d'un signal GPS. Un dispositif sans récepteur GPS peut toujours se synchroniser avec le temps UTC en recevant des signaux venant d'un autre dispositif. La norme IEEE 1609.4 propose de diviser le temps en intervalles alternatifs entre CCH et SCH.

Le canal CCH est essentiellement utilisé pour deux types de messages :

- *Les messages de sécurité routière d'un véhicule à un autre* : Ces messages utilisent le format du message WSM (WAVE short message).

- *Les annonces de service WAVE (WSAs) :* un WSA est utilisé pour annoncer la disponibilité d'un ou plusieurs services WAVE sur les canaux SCHs pendant l'intervalle SCH suivant. Il est prévu que la plupart des services DSRC sont offerts par une unité routière (*roadside unit* - RSU), mais un véhicule ou unité intégrée (*on-board unit* - OBU) peut aussi annoncer et offrir un service.

Seuls les WSMs et WSAs sont permis sur le CCH; les paquets IP n'y sont pas autorisés. Quelques périphériques qui ne veulent pas envoyer ou recevoir des messages de sécurité routière ou des WSAs, peuvent ne jamais s'accorder au CCH, par exemple un RSU assurant un service qui est annoncé par un flux sortant (*upstream*). En général, ces périphériques ont peu d'intérêt et ne sont pas traités dans nos recherches.

Aux Etats-Unis, le Canal 178 est désigné comme CCH et les six autres canaux DSRC sont désignés comme SCHs. Les paquets IPv6 et WSMs sont transmis sur les SCHs. La Figure II.11 illustre le concept de la division du temps définie dans IEEE 1609.4. Le temps est segmenté en "périodes de synchronisation" de 100 ms chacune par défaut. Chaque période de synchronisation (*sync period*) est composée d'un intervalle CCH suivi d'un intervalle SCH. La division par défaut est de 50 ms pour chaque intervalle.

Chaque intervalle CCH et SCH commence par un intervalle de garde de 4 ms qui est utilisé par un dispositif pour donner le contrôle d'une couche MAC virtuelle à une autre pendant la commutation de canal. Le périphérique peut commencer à recevoir des trames dès qu'il est prêt au sein de l'intervalle de garde. Normalement, il ne transmet pas jusqu'à ce que l'intervalle de garde soit complet parce qu'il suppose que ses voisins font encore leurs transitions. L'intervalle de garde rend aussi compte des petites erreurs dans la représentation du temps de l'UTC par le dispositif.

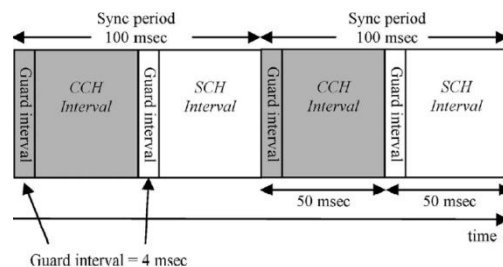


Figure II.11: Division de temps entre CCH et SCH [HL10]

II.13.1.1 Le passage du CCH à un SCH

Si un terminal reçoit un ou plusieurs WSAs pendant un intervalle CCH et s'il est intéressé à obtenir un service annoncé, il change son canal pour un SCH à la fin de l'intervalle CCH. Il

existe deux principales raisons pour lesquelles un périphérique d'une seule radio peut rester à écouter le canal CCH durant l'intervalle SCH :

- Au cours de l'intervalle CCH, le périphérique n'entend pas une annonce d'un service qui l'intéresse.
- Le dispositif perd temporairement la synchronisation avec le temps UTC, et donc sa capacité à discerner les limites entre les intervalles CCH et SCH. Dans ce cas, le dispositif doit rester à l'écoute du CCH jusqu'à ce qu'il reprenne la synchronisation. Le premier cas est le plus courant et intéressant.

Un périphérique qui demeure à l'écoute du CCH au cours d'un intervalle SCH est autorisé à transmettre et à recevoir des trames, mais ces données devraient être limitées aux informations non-urgentes puisque un ou tous les périphériques voisins peut être en écoute d'un canal SCH. En général, les informations essentielles doivent être transmises entre la fin de l'intervalle de garde du canal CCH et la fin de l'intervalle CCH lui-même. C'est le temps de "rendez-vous" dans lequel tous les périphériques sont attendus à l'écoute. Le passage du CCH à un canal SCH est une décision locale : un périphérique ne peut jamais forcer un autre périphérique à quitter le CCH.

II.13.1.2 Problèmes de collisions des trames

Il existe deux problèmes pour la collision des trames durant le changement de canal dans 1609.4. Le premier est le phénomène de collision synchronisée qui est relativement facile à éviter. Le deuxième est le problème de collision par congestion qui peut devenir un problème significatif avec des taux de pénétration élevés.

o Collisions synchronisées des trames

Dans le modèle de la communication des messages de sécurité routière, chaque véhicule diffuse un message de sécurité routière sur le CCH pendant chaque intervalle CCH, i.e. pendant le temps du rendez-vous au cours duquel tous les dispositifs écoutent le canal CCH. Si les couches supérieures, en passant le message vers le bas de la pile de protocoles, ne connaissent pas la répartition sous-jacente du temps, il y a environ 46% de probabilité que le message reste en attente au niveau MAC entre le temps de garde CCH et la fin de l'intervalle CCH, et 54% de probabilité qu'il soit dans la file d'attente du MAC à un moment où il ne peut pas être immédiatement envoyé.

Le standard 1609.4 déclare que toute trame en attente de transmission sur le CCH pendant l'intervalle SCH ou l'intervalle de garde du CCH, considère le canal comme « occupé ». Quand

l'intervalle de garde du CCH se termine, la trame exécute un backoff CSMA/CA normal. La valeur de backoff par défaut est un nombre aléatoire de slots entre 0 et 15. Deux paquets qui choisissent le même nombre de slots sont destinés à entrer en collision lorsque le temps de backoff est décrémenté. Notons que la décrémentation du backoff est suspendue lorsque le canal est occupé.

Si un grand nombre de paquets entre en backoff au début d'un intervalle CCH, la probabilité qu'un des slots de backoff soit choisi par une seule trame est faible, d'où la plupart des trames qui sont perdues à cause des collisions. Ce problème est relativement facile à éviter si la fonction de génération du message dans les couches supérieures est fournie avec un signal indiquant le début d'une période de synchronisation (*sync period*).

Ainsi peut-il choisir de délivrer son message au niveau de la couche MAC pendant un temps aléatoire des 46 ms de l'intervalle CCH. Il peut encore trouver que le canal est occupé : il entre alors en backoff. Mais, avec une charge raisonnable du canal, il est beaucoup moins susceptible de subir une collision. Le standard 1609.4 recommande, mais ne nécessite, pas un dispositif pour prendre des mesures pour éviter ce phénomène.

- *Les collisions des trames liées à la congestion (Congestion-related)*

Le mécanisme 1609.4 du changement de canal permet à un périphérique d'une seule radio de fournir à la fois des applications de sécurité routière et d'autres services DSRC. Cela devrait être utile pour la pénétration du marché par le DSRC.

Point positif: La technologie DSRC peut seulement faciliter l'évitement de collision entre deux véhicules qui sont équipés par des périphériques DSRC. Un périphérique qui ne prend pas en charge des applications autres que la sécurité routière, offre une valeur minimale au cours de la première phase du déploiement. Les experts du marché espèrent que l'accès aux autres services DSRC va assurer une bonne valeur pour encourager les premiers déploiements, qui à leurs tour, vont conduire à un véritable support de sécurité routière quand les taux de pénétration augmentent.

Un périphérique à plusieurs radios peut encore supporter à la fois des services DSRC généraux et de sécurité routière, mais certains fabricants sont préoccupés par le coût supplémentaire de la radio supplémentaire. Alors, le changement de canal en 1609.4 a alors été motivé par le désir de supporter les deux types d'applications (générales et sécurité routière) avec une seule radio.

Point négatif: Par ailleurs, le schéma 1609.4 du changement de canal gaspille beaucoup de bande passante. En particulier, plus de la moitié de la bande passante du CCH ne peut pas être utilisée pour transmettre des informations essentielles pour la sécurité routière. Comme noté ci-

dessus, le modèle de communication de sécurité routière suppose que chaque véhicule envoie un message de sécurité routière durant 100 ms d'une période *sync*, mais ce temps est diminué à 46 ms, phase entre la fin de l'intervalle de garde du CCH et la fin de l'intervalle CCH lui-même. Au cours de la première phase du déploiement, cette limitation n'est pas susceptible d'être important puisque seulement une fraction des véhicules sera équipée par des dispositifs DSRC.

Cependant, pour des taux de pénétration plus élevés, la capacité des canaux nécessaire pour délivrer tous les messages de sécurité routière devient une préoccupation. Donc, la limitation de cette capacité par la procédure du changement de canal peut conduire à des problèmes de performances de la sécurité routière.

Le problème peut être vu avec un calcul à la louche. Supposons que chaque message de sécurité routière est de 3000 bits, et que la couche PHY DSRC utilise un taux de transfert de données 6 Mbits/s. Alors, un canal de sécurité routière ne peut pas supporter plus de 2000 messages par seconde, ou pas plus de 200 véhicules envoyant un message dans chaque période de 100 msec. Avec l'alternance CCH/SCH qui limite la période à 46 ms, le nombre des véhicules passe à 92 véhicules. Quand la charge atteint 100 % de capacité, le protocole CSMA/CA souffre d'un nombre de collisions croissant, et le nombre de véhicules à l'intérieur de la couverture de communication est limité à moins de 92 [HL10].

Il y a des techniques que les véhicules peuvent utiliser pour le contrôle de la congestion, aux dépens de la diminution des performances des communications, mais le point principal est que le changement de canal impose une contrainte de capacité significative pour la communication de sécurité routière.

II.14 Conclusion

Dans ces deux premiers chapitres, nous présentons quelques problématiques et l'état de l'art des réseaux véhiculaires.

Les besoins pour des applications de sécurité routière ont poussé les organismes internationaux et les industries à développer des technologies spécifiques aux réseaux véhiculaires pour contribuer dans ce domaine (DSRC/WAVE, CALM,...). Plusieurs applications de sécurité ou d'autres services de données (accès internet,...) sont ainsi développées. Les réseaux véhiculaires possèdent des caractéristiques spécifiques comme le changement rapide de la topologie, l'absence d'exigence en termes de puissance, la présence d'équipement de positionnement géographique (par exemple, le GPS), la grande couverture de transmission des véhicules arrivant à 1000 m, etc. Cela nous amène à présenter des grandes problématiques au niveau de l'accès au canal et

d'allocation de ressources, et qui sont traitées dans le reste de cette thèse. Notre recherche se concentre principalement dans la couche MAC, et ainsi dans la couche physique qui sont décrits dans ce chapitre. Pour l'étude de performance des réseaux véhiculaires, nous avons présenté dans ce chapitre les modèles de trafic routier et les différents types de simulateurs.

Dans le prochain chapitre, nous commençons par la première problématique qui repose sur l'allocation de ressources et l'accès aux canaux CCH et SCH.

Chapitre III. Allocation de ressources dans l'IEEE 802.11p/1609.4

C'est un problème difficile que de faire fonctionner les dispositifs radio dans les réseaux véhiculaires, et en particulier dans les communications véhicule-à-véhicule (V2V), sur les sept canaux DSRC attribués par la FCC ainsi que de changer de canal, pour des applications de sécurité routière et d'autres applications ordinaires.

Dans ce chapitre, une nouvelle approche MAC d'allocation à canaux multiples pour le mode V2V est proposée. Cette approche est conforme à la norme IEEE1609.4-2010 de l'architecture WAVE pour un fonctionnement à canaux multiples, et elle vise à offrir un support pour les services de données, tout en maintenant l'acheminement des messages de sécurité routière et des paquets de contrôle.

III.1 Rappel

La technologie DSRC radio est essentiellement celle de l'IEEE 802.11a adaptée à un fonctionnement allégé (peu de surcharge de trafic, signalisation,...) dans le spectre DSRC, et est normalisée par l'IEEE 802.11p. L'IEEE 1609 est une norme de la couche de haut niveau sur laquelle est basée l'IEEE 802.11p [Vehicular Applications and Inter- Networking Technologies]. La famille des normes IEEE 1609 pour les réseaux véhiculaires se compose de quatre normes. L'une d'elles est l'IEEE P1609.4-WAVE pour les systèmes à canaux multiples. Elle assure la coordination de la bande des fréquences, elle gère l'utilisation des couches inférieures des sept canaux DSRC, et s'intègre avec la norme IEEE 802.11p [HL10].

Comme ils disposent de sept canaux sur lesquels ils peuvent émettre, les véhicules doivent pouvoir se coordonner pour déterminer sur quels canaux se synchroniser et émettre. Ce problème est difficile, particulièrement pour des périphériques qui ne peuvent écouter ou émettre que sur un seul canal à la fois : si un nœud veut émettre des données à l'intention d'un autre, il est nécessaire que ce canal soit libre d'une part et, d'autre part, que son interlocuteur soit prêt à les recevoir sur ce même canal. Il faut donc s'accorder sur le canal à utiliser. La solution de l'IEEE 1609.4 réserve l'utilisation d'un canal en tant que canal de contrôle (CCH) sur lequel les

émetteurs se rendent périodiquement, tandis que tous les autres canaux sont utilisés comme canaux de service (SCH). Le CCH est destiné à l'échange des informations de gestion, y compris les annonces de service WAVE (WSA), et les messages WAVE dits courts (WSMs). Un canal de service est destiné à l'échange des trames de gestion et des informations de la couche supérieure (WSMs, paquets IPv6). Il ne sert donc qu'au transfert des données WAVE.

En outre, l'IEEE 1609.4 définit une division alternative du temps entre intervalles CCH et intervalles SCH. Lors des intervalles CCH, tous les nœuds se retrouvent à écouter le canal de contrôle CCH. La synchronisation entre les deux intervalles suppose que tous les périphériques ont accès au Temps universel coordonné (UTC), ce qui est usuellement le cas dans les véhicules grâce à un signal GPS par exemple. Ce concept de la division du temps définie dans l'IEEE1609.4 est illustré sur la Figure III.1.

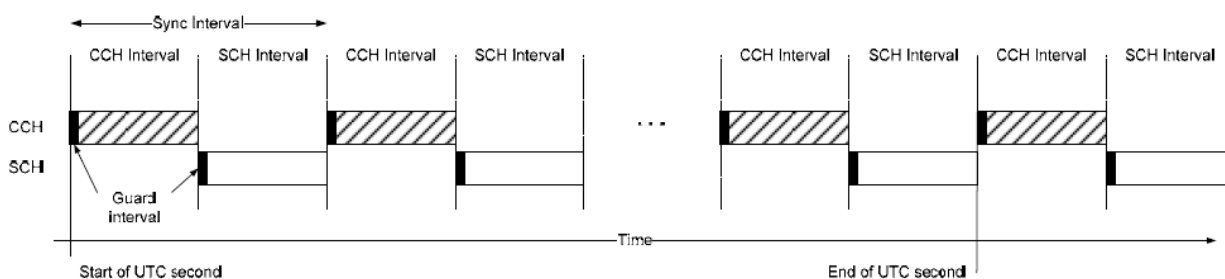


Figure III.1: Division du temps selon l'IEEE1609.4: sync, de garde, CCH et SCH (cf. [IE410])

Le temps est discrétisé en des intervalles de temps périodiques appelés «périodes de synchronisation» d'une durée de 100 ms chacune. Chacune se compose de deux intervalles de 50ms: un intervalle CCH suivi d'un intervalle SCH. Chaque intervalle commence avec un intervalle de garde de 4ms, qui est utilisé pour tenir compte du changement du canal et des inexactitudes de cadencement entre les différents dispositifs.

III.1.1.1 Commutation sur un SCH

Si un véhicule a un service de données à assurer, il doit choisir un canal de service sur lequel il peut transmettre pendant l'intervalle SCH. Le numéro du canal correspondant est transmis au récepteur via le paquet d'annonce de service (WSA), envoyé par l'émetteur sur le canal de contrôle (CCH) pendant l'intervalle CCH. Dans les réseaux véhiculaires possédant une grande couverture de transmission (1000m), le canal de service sélectionné peut être fortement occupé surtout lorsque la densité des véhicules est grande (cas des bouchons routiers par exemple).

III.1.2 Problématiques

Augmenter la probabilité de sélection d'un canal libre à un temps donné est un problème important. Normalement, les messages de données de sécurité routière, parce qu'ils sont à priorité plus élevée que les autres, et les paquets de signalisation sont transmis sur le canal CCH pendant l'intervalle CCH, et les paquets de données de priorité ordinaire le sont sur un des canaux SCHs pendant l'intervalle SCH. Les données urgentes peuvent bien être transmises sur le canal de contrôle mais dans des messages courts, ce qui manifestement dans l'esprit des concepteurs de la norme devrait permettre de limiter la saturation du CCH en théorie. Il est donc nécessaire d'attendre le prochain intervalle SCH pour envoyer des données ordinaires si on est en période CCH. Cependant, la dernière version de la norme IEEE 1609.4 de 2010 a relâché cette contrainte en autorisant un accès immédiat des communications sur un canal SCH sans attendre le prochain intervalle SCH. Il prévoit également un accès étendu au SCH qui permet aux communications, dans le cas où l'acheminement des services n'est pas terminée à la fin de l'intervalle SCH en cours, de continuer l'émission sur le canal SCH durant l'intervalle conçu pour le CCH.

Un autre problème important à traiter est de savoir comment un émetteur/récepteur peut rester à l'écoute d'un canal SCH pendant un intervalle CCH et répondre, en même temps, aux exigences de bonne réception des annonces de services, messages de signalisation et messages de données, importantes pour la sécurité routière, transmis pendant l'intervalle CCH. Dans certaines mécanismes d'allocation de canal, comme notre première approche proposée dans ce chapitre, il est important pour le véhicule d'être au courant des paquets de signalisation échangés entre les voisins pour établir une liste de l'état des canaux de service.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche MAC à canaux multiples pour les communications V2V sans RSU. Notre protocole est compatible avec la couche MAC du WAVE. Il repose sur deux concepts. Le premier est un mécanisme opportuniste pour sélectionner un canal libre avec une grande probabilité. Les nœuds, écoutant régulièrement ce qui passe sur le CCH, sont avertis après un certain temps passé dans un secteur géographique de l'utilisation de certains canaux. Ils maintiennent alors une liste des canaux libres et occupés. Lorsqu'ils doivent émettre, ils choisissent un canal non occupé. Il est possible qu'ils n'aient pas une information fraîche des canaux disponibles dans leur secteur géographique. On divise alors aussi la carte routière en secteurs géographiques, chaque secteur disposant d'un canal périodique attribué par défaut. Chaque véhicule utilise ce canal par défaut, selon sa localisation, pour la transmission s'il ne trouve pas de canal dont il sait qu'il est libre. . Les canaux sont attribués

par secteurs de telle façon qu'on limite les recouvrements entre secteurs voisins et changés périodiquement pour éviter l'utilisation du même canal.

Dans le deuxième concept de notre protocole, deux mécanismes différents sont proposés pour utiliser efficacement les canaux de service pour des applications de données non-urgentes, et en même temps assurer l'acheminement des messages de sécurité routière. Le premier mécanisme s'appuie sur une période définie à l'intérieur de l'intervalle CCH qu'un nœud qui a des données à envoyer sur le CCH utilise pour avertir les autres qu'il faut écouter le CCH. L'émission au cours de cette période permet de décider si le véhicule peut rester à l'écoute du canal de service ou s'il doit écouter le canal de contrôle dans son intégralité. Le deuxième mécanisme, plus spécifique aux communications V2V, utilise les communications à sauts multiples entre les véhicules qui, en particulier, utilisent les protocoles de routage géographiques. Ce type de protocoles achemine les paquets en se basant sur la localisation géographique de la destination. Ces véhicules, qui transmettent des données d'un nœud à un autre via plusieurs sauts, constituent ce que nous appelons une "chaîne de transmission". Notre second mécanisme permet à un véhicule sur deux de cette chaîne de profiter du temps de l'intervalle CCH pour retransmettre au suivant sur la chaîne sur un canal SCH les paquets de données qu'il vient de recevoir à l'intervalle SCH d'avant. A émet pendant les intervalles SCH sur un canal SCH à B, puis retourne sur le CCH pour l'écouter pendant l'instant CCH suivant. Pendant cet instant CCH suivant, B retransmet sur un canal de service les données reçues de A à C. C transmet alors ces données à D pendant l'intervalle SCH suivant sur un autre canal SCH, et ainsi de suite. C'est au véhicule en début de chaîne qu'est assigné le rôle de détecter les données urgentes, de signalisation ou autres transmises sur le CCH et de les transmettre aux autres véhicules de la chaîne, via cette chaîne.. Un autre rôle de l'émetteur initial est de maintenir la liste d'états des canaux de service et de la faire parvenir aux membres de la chaîne de transmissions.

Les résultats de simulation prouvent que notre protocole, grâce au premier concept, augmente le taux d'accès aux canaux de service, tandis que le deuxième permet d'occuper pleinement tous les canaux de service et donc d'améliorer leur taux d'utilisation. L'objectif important qui est également atteint, est d'assurer les contraintes imposées sur le réseau par les applications de sécurité routière et de maintenir, élevé, le taux d'acheminement des messages de sécurité routière.

III.2 Etudes antérieures

Différents algorithmes et protocoles ont été proposés pour un schéma MAC à canaux multiples, soit pour les MANETs soit pour les VANETs.

Dans [MS+08], les auteurs présentent une classification et une comparaison entre les principaux protocoles MAC à canaux multiples dans les MANET. En se basant sur leurs principes de fonctionnement, ces algorithmes peuvent être classés en quatre groupes: 1 - séquence de sauts de canaux commune [TG00a, TG00b, ZRK04], 2 - les protocoles de Rendez-vous en parallèles [SY03, SWM07], 3 - canal de contrôle dédié (comme dans le standard évoqué ci-dessus et dans notre proposition sauf qu'un équipement radio est dédié au canal de contrôle) [WL+00, WL+02, HLL02], 4 - Division du temps en deux phases [SY03, SV04].

Une séquence de sauts de canaux est répétée par tous les nœuds inactifs dans le premier groupe. Pour les propositions du deuxième groupe, les nœuds parcourent la liste des canaux selon une séquence donnée mais qui diffère pour chaque nœud. Dans les deux cas, le véhicule passe rapidement et périodiquement d'un canal à un autre. Même si chaque passage prend environ 80 μ s, une large période de temps est perdue et des paquets peuvent être manqués. La communication entre les véhicules doit être rapide en raison de leur mobilité élevée, et aussi fiable, en particulier pour les paquets de sécurité routière. Ceci n'est pas assuré avec une mobilité élevée du véhicule et un changement fréquent des canaux. En conclusion, cette technique (séquence de sauts de canaux) n'est pas efficace et très coûteuse pour les communications véhiculaires en termes de perte de temps et de fiabilité.

Quant au troisième groupe, celui où un canal est dédié au contrôle, deux radios, une pour les canaux de transmission de données et l'autre est dédié au canal de contrôle, sont utilisées pour chaque émetteur/récepteur, ce qui est coûteux en termes d'équipements. Enfin, dans les propositions du quatrième groupe on divise le temps en 2 phases. La première est la phase de négociation sur le canal par défaut. La seconde phase est réservée au transfert de données sur tous les autres canaux. Cette technique peut être convenable, mais elle exige un mécanisme efficace de sélection de canal, ainsi que plusieurs adaptations pour répondre aux exigences en termes de QoS (différenciation entre les paquets de sécurité routière et ceux de données) et de mobilité. Notons que le mécanisme RTS / CTS est utilisé dans tous les algorithmes précédents pour établir une communication pendant la phase de contrôle.

Toutes ces propositions tentent d'apporter des réponses dans la recherche d'un bon système véhiculaire à canaux multiples. Cependant, aucune d'entre elle n'est réellement adaptée aux réseaux véhiculaires car elles mettent un certain temps à réagir, soit à cause du temps pris pour

parcourir l'ensemble des canaux soit à cause de celui pris pour se mettre d'accord sur un canal. Nous pouvons en conclure que les algorithmes MAC multicanaux, proposés dans le cadre des MANET, ne répondent pas aux diverses exigences des VANETs et ne peuvent pas être appliqués en communications V2V. Un mécanisme plus efficace pour la réception des messages de sécurité routière est nécessaire..

Les réseaux VANETs sont un cas particulier des MANETs mais ils s'en distinguent par des architectures de réseaux hybrides, une grande mobilité des nœuds, l'absence de contrainte d'énergie, et la disponibilité d'un outil de positionnement géographique. En réalité, la grande mobilité des véhicules et le changement rapide de topologie empêchent l'utilisation pour les VANETs de la plupart des algorithmes MAC proposés pour les MANETs . C'est pourquoi des propositions spécifiques aux VANETs ont été faites.

Dans [MLS05], les auteurs proposent un mécanisme MAC pour réseaux VANETs à canaux multiples pour diverses applications commerciales et de sécurité routière. Cette proposition se concentre sur la satisfaction des exigences de sécurité routière et des données non-urgentes en cas de présence d'une infrastructure (RSU). Les auteurs supposent que si aucune infrastructure n'est présente, les véhicules ne peuvent communiquer que les données de sécurité routière en utilisant un des protocoles ad-hoc connus de la littérature. Toutefois, et dans certaines régions, il est important de positionner un mécanisme qui peut maintenir à la fois les messages de sécurité routière et les données même lorsqu'une infrastructure n'est pas présente (grâce à une communication à plusieurs sauts).

Dans [XQ+08], un protocole MAC adaptatif à canaux multiples pour les VANETs denses utilisant des antennes directionnelles est proposé. Il s'appuie sur la synchronisation entre deux antennes radios dans chaque véhicule. Comme nous l'avons déjà dit, n'avoir qu'une seule antenne radio est bien préférable.

Les autres protocoles proposés exploitent le concept de clusters. Dans [SZ07], le protocole proposé se compose de trois principaux protocoles: le protocole de configuration du cluster, le protocole de coordination et communication entre les véhicules d'un même cluster (intra-cluster), et le protocole de communication entre les clusters (inter-clusters). Ce protocole a besoin de deux transceivers sur chaque véhicule. Un autre protocole basé sur le regroupement en clusters avec un seul transceiver à chaque nœud est proposé dans [KJL09]. Ce protocole MAC à plusieurs canaux se base sur le chef du cluster pour empêcher le conflit entre les véhicules. Le chef du cluster gère la table d'état des canaux de son cluster et diffuse périodiquement une liste d'utilisation des canaux sur le canal de contrôle. Chaque véhicule transmet, sur le canal de contrôle, une demande d'affectation de canal (RCA) à la tête du cluster pour obtenir une

allocation de canal de données [SZ07]. Au contraire du protocole de [SZ07], les auteurs de [KJL09] ne considèrent pas l'interférence entre les véhicules adjacents dans deux clusters différents.

Un protocole plus efficace sur la technique d'accès au médium pour les réseaux véhiculaires à clusters, a été publié dans [RM08]. Il utilise aussi le concept de mise en clusters, mais maintenant avec un seul transceiver pour chaque véhicule. Il considère aussi les communications internes au cluster et entre clusters. Pour les premières, il utilise une approche basée sur l'ordonnancement, tandis que pour les secondes il utilise une approche basée sur la contention. De plus, il assure une qualité de service favorable pour l'échange des messages de sécurité routière et des données au sein du cluster. Chaque cluster doit contenir un véhicule chef de cluster, un autre comme qui sert de passerelle pour transmettre les données hors du cluster et les véhicules restants sont les membres du cluster.

Utiliser des clusters dans des environnements véhiculaires peut être problématique à cause de la grande mobilité des véhicules. Le chef de cluster prend le rôle d'une station de base, mais ici cette «station de base» est très mobile. Par conséquent, de nombreuses difficultés peuvent surgir en raison de la haute volatilité de la topologie, à commencer par la définition elle-même du cluster et ne pas terminer par la sélection de la tête de cluster (CH). De plus, la réservation des slots de temps, faite par la tête de cluster pour les membres de cluster, peut causer un gaspillage de temps. En outre, la surcharge de trafic augmente avec la nécessaire signalisation pour la synchronisation et l'attribution des slots entre les différents membres du même cluster et entre deux clusters différents. En conclusion, l'utilisation d'un mécanisme central pour la communication des données et la réservation des canaux dans les réseaux véhiculaires est très complexe et peut être inefficace dans certains environnements.

Dans [WLZ10], une amélioration de la couche MAC à plusieurs canaux de l'IEEE 1609.4 est proposée (VCI MAC). La couche MAC du WAVE fixe l'intervalle CCH à 50 ms alors que l'approche VCI MAC proposée adopte les intervalles CCH adaptés en fonction de la charge des messages WSA et le temps du demandé sur le canal SCH pour envoyer les paquets de données. Cependant, cette proposition utilise encore une station de base (RSU) pour, cette fois-ci, diffuser un paquet contenant la durée de l'intervalle CCH aux véhicules dans sa zone de couverture. Cette durée est calculée par la RSU en se basant sur le trafic routier de l'environnement, y compris le nombre des véhicules présents dans sa zone de couverture.

Peu de mécanismes d'accès aux canaux ont été proposés qui amélioreraient le taux d'utilisation des canaux de service (SCH) en permettant à un véhicule de rester sur un canal de service tant qu'il en a besoin avant de retourner au canal de contrôle. Un tel mécanisme est

présenté dans [W+09], mais il a ce désavantage que les messages d'avertissement urgents peuvent être manqués par les véhicules qui écoutent le SCH pendant l'intervalle CCH. Dans [L+09], les auteurs s'appuient sur un équipement d'infrastructure à multiples radios qui est capable de surveiller toutes les communications de sécurité routière sur le CCH et les SCH, et rediffusent tous les messages d'avertissement d'urgence à tous les véhicules présents sous sa couverture. À côté de la complexité de la gestion de tous les véhicules dans une région à forte densité de trafic routier, la principale déficience du mécanisme proposé 'est qu'à l'extérieur de la couverture de la station de base, l'accès aux messages de sécurité routière n'est pas disponible.

Pour résumer, les protocoles spécifiquement développés pour les VANETs soit supposent une infrastructure, ce que nous préférons éviter, soit requièrent plusieurs interfaces radios, ce que nous voulons éviter, soit reposent sur des clusters, mais cela est complexe à gérer, peu réactif et impose une surcharge de trafic. Des mécanismes pour des interfaces MAC à canaux multiples ont été proposés mais soit ils ne permettent pas vraiment une fiabilité suffisante pour la réception des données envoyées sur le CCH, soit ils requièrent une infrastructure, soit ils exigent encore plusieurs modules radio. Resterait la possibilité de réutiliser les protocoles développés dans le cadre des MANETs mais, comme nous l'avons vu, ils n'ont pas été conçus pour répondre aux contraintes spécifiques des réseaux véhiculaires. Ils sont trop complexes et trop longs à réagir. Nous pensons qu'il manque à ces mécanismes de profiter de la vitesse gagnée par un mécanisme qui serait opportuniste. C'est l'objet de la proposition que nous allons maintenant présenter de tirer profit de toutes les connaissances qu'un véhicule est amené à avoir pour gagner en réactivité.

III.3 Modèle du système

En réseaux ad-hoc véhiculaires, les véhicules échangent les informations par des communications V2V en cas d'absence de l'infrastructure. Chaque véhicule possédant un dispositif d'une seule couche physique ne peut pas fonctionner simultanément sur des canaux radio multiples. Il est également équipé d'un système de positionnement global (GPS) qui peut fournir la position géographique, la vitesse, le temps actuel, et la direction d'un véhicule.

III.3.1 Sélection du canal de service

III.3.1.1 Motivation

Dans la norme IEEE 1609.4-2010, il n'est pas indiqué comment le véhicule sélectionne le SCH pour transmettre ses données. Une des solutions est de le sélectionner au hasard. Une autre plus déterministe est de surveiller tous les canaux de service et d'écouter chacun d'eux pendant un

certain temps. Si l'un d'eux est libre pendant ce temps, le véhicule peut admettre que ce canal n'est pas occupé et qu'il peut l'utiliser. Cette méthode est coûteuse en temps. Une méthode plus fiable que la première et ne nécessitant pas d'écouter le SCH comme la deuxième est d'utiliser le concept de vecteur des allocations du réseau (NAV) : chaque véhicule écoute les annonces WSAs envoyées par ses voisins pendant l'intervalle CCH, puis il construit une liste d'états contenant les numéros de canaux et leur statuts (libre ou non), qu'il met ensuite à jour périodiquement et, lorsqu'il veut transmettre ses données, il choisit le premier canal libre selon sa liste d'états. Pour être plus précis avec cette méthode, un véhicule doit écouter tous les WSAs envoyés par les véhicules présents dans une certaine zone géographique que nous appelons dans la suite « zone sensible ». Le problème de cette méthode est qu'elle est très dépendante à une bonne mise à jour des listes d'états, ce qui n'est pas toujours assuré car des véhicules peuvent manquer certaines WSAs envoyées dans leurs zones sensibles.

De manière générale, l'absence de signal, ou sa faiblesse, est due à de nombreuses causes possibles: effets de réflexion et de diffraction dus aux maisons, aux structures de hauteur élevée et aux voitures garées, distance de transmission importante provoquant un affaiblissement du signal ou bien augmentant les effets des réflexions et diffractions. Normalement, cette zone sensible est égale à la portée de transmission d'un véhicule qui touche les 1000 m dans les VANETs. La « zone sensible » large et la grande densité de trafic rendent le problème de la surdité des récepteurs devant les messages qu'ils devraient recevoir plus fréquents et chroniques. Les messages peuvent aussi n'être pas reçus à cause de la volatilité de la topologie. La Figure III.2 présente deux scénarios où des messages ne sont pas reçus par un véhicule: le véhicule A envoie une annonce WSA à un temps $t = t_s$, le véhicule C ne reçoit pas bien le message de A à cause de l'effet de diffraction, de réfraction, ou de réflexion du signal, quant au véhicule B, il entre dans la zone sensible de A après le temps de transmission du message ($t > t_s$) et n'a donc pas le message non plus.

Notre objectif est de minimiser la portée de la « zone sensible » pour diminuer l'effet des problèmes de transmission sur l'interface air et d'augmenter ainsi l'exactitude de la liste d'allocation, sans avoir besoin d'écouter les canaux de service. Cela a pour effet de minimiser la probabilité de collision sur les SCHs.

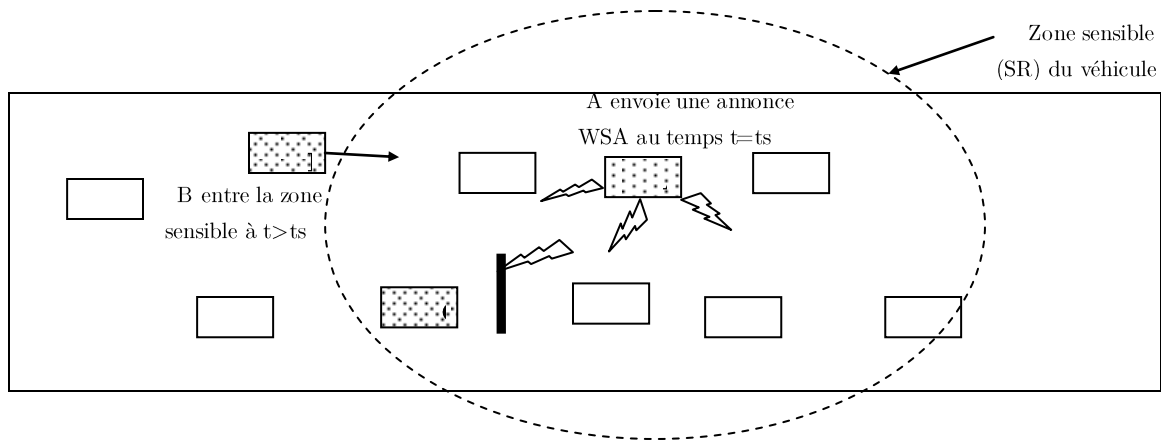


Figure III.2 : Quelques exemples de sources de paquets non reçus

III.3.2 Notre proposition: Mécanisme d'accès à canaux multiples opportuniste (Hybrid Multichannel Selection)

L'idée de base du mécanisme est que, lorsqu'un nœud doit émettre, il choisit un canal dont il sait qu'il n'est pas occupé. C'est possible car les nœuds écoutent la signalisation qui passe sur le CCH et savent donc quel canal est occupé s'ils sont restés suffisamment au même endroit et s'ils ont bien reçu tous les paquets de signalisation. Pour le cas où la liste est vide, un canal par défaut est attribué. Un utilisateur qui veut émettre choisit donc ce canal par défaut, sauf s'il sait qu'il est occupé, auquel cas il en choisit un dont il n'a pas l'assurance qu'il est occupé. C'est donc un mécanisme opportuniste qui s'efforce de tirer parti de la connaissance sur l'occupation des canaux que l'on voit passer sur le CCH. Le choix du canal par défaut obéit à une procédure qui permet d'éviter une trop grande réutilisation des canaux à la fois dans l'espace et dans le temps : ils varient en fonction de la position géographique d'une part et du temps courant d'autre part.

Nous divisons la route en zones. La longueur de chaque zone est $L = 2 * R$, où R est le rayon de transmission du véhicule. Chaque zone est divisée en secteurs (Figure III.3). Le nombre de secteurs est égal à N_{sch} , le nombre de canaux de service. La longueur de chaque secteur est $N_s = L / N_{sch}$. Chaque secteur a son propre canal. Ce canal varie périodiquement avec le temps. A la fin, chaque zone dispose d'un ensemble de six canaux différents qui changent périodiquement avec les périodes de synchronisation (sync periods).

Dans notre schéma, chaque véhicule est muni d'un récepteur GPS, et d'une table d'allocation qui affecte un numéro de canal SCH, par défaut, à chaque secteur géographique et pendant chaque période sync (100ms).

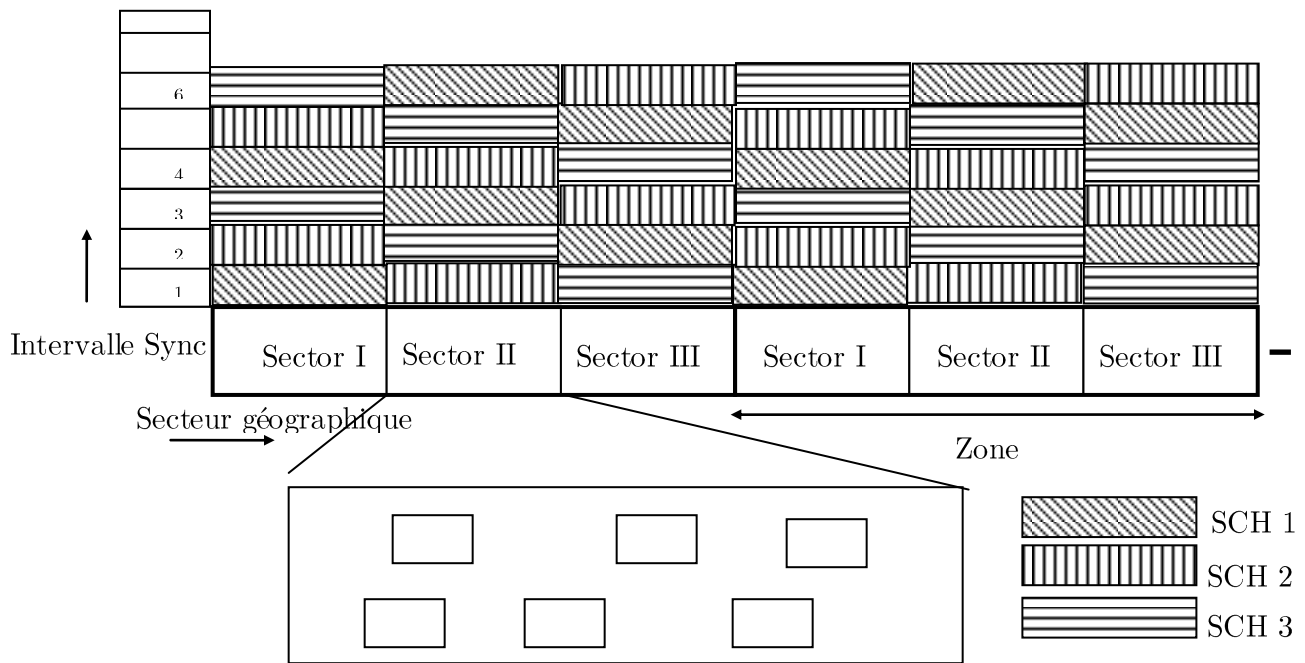


Figure III.3: Allocation du canal basée sur la date et la position géographique

Sur la Figure III.4 on peut voir que, du fait du partitionnement géographique de l'ensemble des canaux, la zone sensible est réduite à la portée de transmission divisée par le nombre des SCHs (six en DSRC). Au cours de chaque intervalle de synchronisation (sync interval), si un véhicule veut transmettre ses données, il détermine le canal par défaut lié à sa position géographique à partir de sa table d'allocation et vérifie de sa liste d'états qu'il n'est pas déjà occupé. Si ce canal par défaut est mentionné occupé, le véhicule ne l'utilise pas. Dans ce cas, il a deux choix : le plus garanti est d'attendre l'intervalle de synchronisation suivant et choisir le canal par défaut de l'instant suivant. L'autre solution consiste à choisir, à partir de la liste d'états, un des canaux par défaut de ses secteurs voisins qui soit libre, en commençant par le plus proche. En effet, il est probable que la liste d'états n'est pas mise à jour pour les canaux par défaut, des secteurs les plus éloignés.

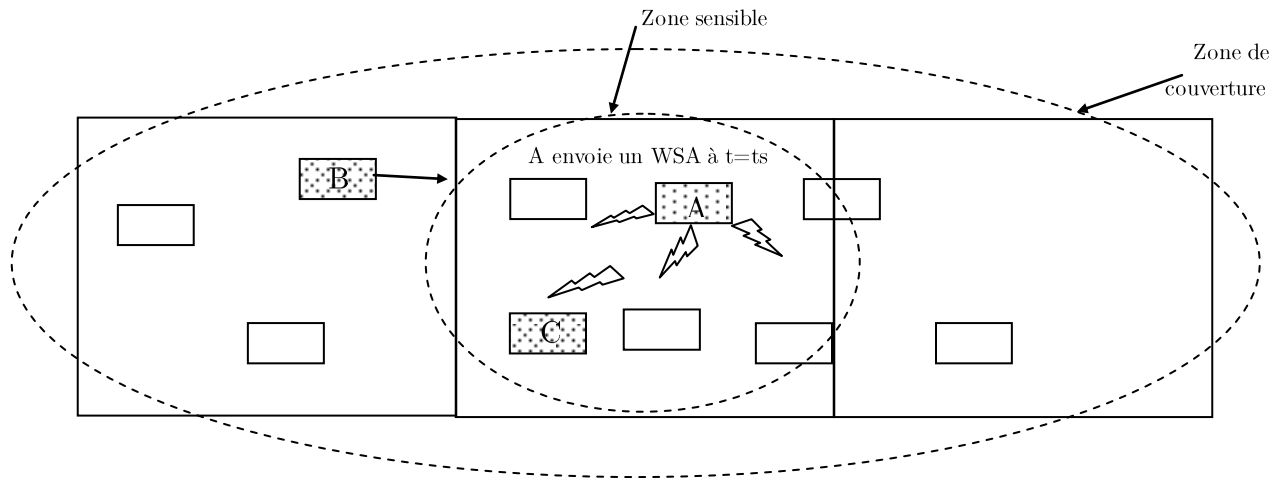


Figure III.4: Les différentes zones de couverture et sensible.

Sur la Figure III.5, nous montrons un exemple de table d'allocation et de liste d'états du véhicule-A à l'instant t . Lorsque A veut sélectionner son SCH, il détermine qu'il se trouve dans le secteur S3 en utilisant les données GPS, puis il regarde la table d'allocation. Le canal par défaut alloué pour S3 est le SCH4. Ce canal est occupé conformément à la liste d'états du véhicule-A. Dans ce cas, le véhicule-A sélectionne le SCH5, canal par défaut libre du secteur S4, le secteur le plus proche de sa position géographique.

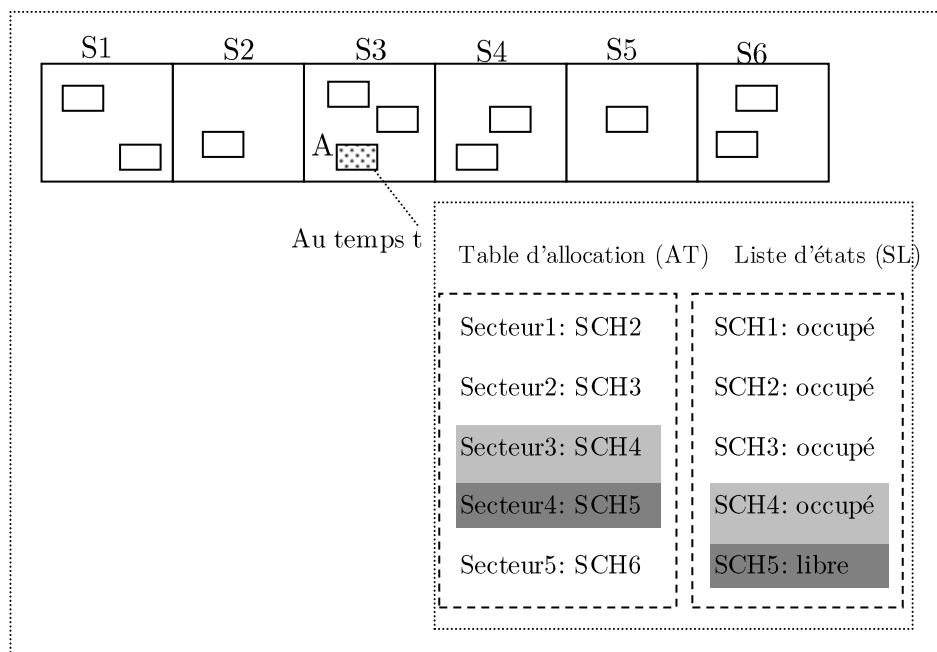


Figure III.5: Exemple de Table d'allocation et de Liste d'états des canaux

III.3.3 Accès aux canaux de service

Dans l'IEEE 1609.4, les modes possibles d'accès au canal sont un accès continu, un accès alternatif entre canal de service et canal CCH, un accès immédiat au SCH, ou un accès étendu au SCH, comme illustré sur la Figure III.6. Les modes d'accès immédiat et étendu peuvent être combinés en un seul accès. L'accès immédiat au SCH permet au véhicule de communiquer immédiatement sur un canal SCH sans attendre le prochain intervalle SCH, tandis que l'accès étendu au SCH permet les communications sur un SCH sans faire un accès au CCH. Notre proposition utilise ces deux modes.

III.3.3.1 Accès immédiat au SCH basé sur l'écoute du canal (*Listening-based Immediate SCH Access -LISA*)

Le protocole IEEE 1609.4 déclare que la durée totale d'une période est 100 ms, dont 50 ms pour le CCH et 50 ms pour le SCH. Comme mentionné précédemment, le standard IEEE 1609.4-2010 permet aux véhicules de rester sur le SCH pendant l'intervalle du CCH. La principale difficulté ici est de savoir comment cela peut être fait sans perdre tous les paquets de sécurité routière qui peuvent être transmis sur le CCH durant cette période. Dans notre solution (Figure III.7), nous définissons une période d'écoute (TLS) d'un ou deux slots. Cette période a pour but de déterminer si des paquets de sécurité routière sont transmis au cours de la partie restante de période du CCH courante. Dans ce cas, tous les véhicules doivent rester sur le CCH pour recevoir ces paquets urgents. Sinon, ils peuvent retourner sur le SCH.

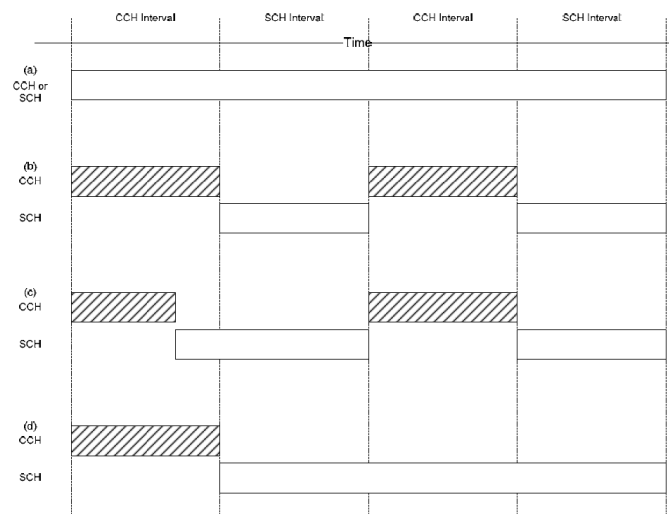


Figure III.6: Modes d'accès au canal: (a) continu, (b) alternatif, (c) immédiat, and (d) étendu [IE410]

Avant chaque intervalle CCH, un véhicule possédant un message urgent dans la file d'attente, envoie un signal au cours du TLS. L'important est qu'on puisse détecter ce TLS comme occupé.

Il n'est pas grave qu'il y ait plusieurs émissions à ce moment-là car cela sert juste à signaler que du trafic doit être envoyé sur le CCH. Pendant l'intervalle CCH, si un véhicule veut rester sur le SCH, il écoute le CCH au cours du TLS. S'il détecte un signal, il sait qu'il y a des messages de sécurité routière qui peuvent être envoyés et il revient alors sur le CCH. Ce qui est important est de détecter la présence d'un signal (bruité ou non).

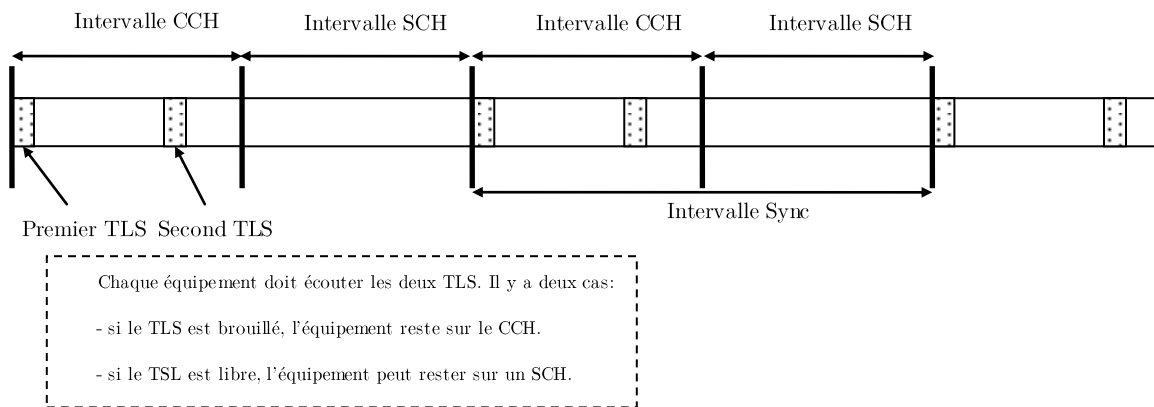


Figure III.7 Schéma proposé (LISA): Intervalle sync avec deux périodes d'écoute (TLS)

Dans l'autre cas, tout véhicule qui ne détecte aucun signal pendant la période de TLS, a la possibilité de rester dans le SCH ou de revenir au CCH.

L'emplacement de la période TLS doit être choisi au mieux dans l'intervalle CCH. Nous plaçons la période TLS au début de la période CCH mais dans le cas où les véhicules ont des messages périodiques à transmettre à chaque période sync, l'intervalle TLS contient toujours un signal ou plusieurs superposés. Placer ainsi le TLS en début de période n'est pas optimal puisque des messages non périodiques peuvent aussi être envoyés comme des messages d'urgences. Nous choisissons alors de définir un deuxième TLS. Cet intervalle pour but d'informer les véhicules de tous les messages de sécurité routière qui n'ont pas encore été envoyés. Si un véhicule n'a pas eu la possibilité de transmettre son message urgent avant le deuxième TLS, il le fera par la transmission d'un signal d'annonce sur le CCH durant ce TLS. En d'autres termes, on sépare l'intervalle CCH en deux sous-intervalles CCH dédiés l'un à l'envoi de tout type de messages, périodiques ou urgents, et l'autre au trafic urgent qui n'aurait pas pu être envoyé avant.

Un nouveau problème consiste à déterminer l'emplacement du deuxième TLS. Nous le fixons de telle manière qu'on obtienne des performances optimales dans la réception des messages de sécurité routière et une utilisation importante du canal SCH. Comme ces deux critères sont antagonistes, il y a un optimum que nous choisissons. Ceci sera décrit dans la section de simulation.

III.3.3.2 Chaîne de transmission périodique

Dans cette partie, nous proposons une autre approche pour l'amélioration d'accès au canal de service avec la possibilité de recevoir les paquets de sécurité routière transmis sur le CCH. C'est une approche complémentaire au mécanisme décrit précédemment. Au cours des communications véhicule-à-véhicule (V2V), les paquets de données sont transmis et acheminés d'un véhicule à un autre par des communications à plusieurs sauts jusqu'à ce qu'ils arrivent à la destination, formant ce que nous appelons une «chaîne de transmission ». Le but de cette « chaîne » est de gagner du temps lorsque l'expéditeur passe au canal de contrôle en permettant aux autres véhicules de la chaîne de continuer d'émettre et recevoir pendant ces instants, le trafic envoyé sur le CCH étant injecté dans la chaîne par l'expéditeur qui, lui, écoute bien le CCH.

Dans cette chaîne, nous pouvons distinguer trois types de véhicules. Le premier type de véhicules (la source) possède tous les données à transmettre. Il commence la transmission au véhicule du deuxième type, le relais, quand les deux sont à la fois accordés sur le même SCH. En même temps qu'il reçoit une séquence de données, le véhicule-relais transmet périodiquement ses données au troisième élément de la chaîne (le forward final) au même moment où la source écoute le CCH.

Figure III.8La Figure III.8 explique le concept principal de notre mécanisme. Le rôle du véhicule-source (X), qui possède les données, est de transmettre ses données à un autre véhicule intéressé par elles. Dans ce cas, le protocole de routage préféré est celui basé sur la position géographique des véhicules, et dans lequel les paquets de données sont acheminés par le véhicule le plus loin de la source, via des communications à plusieurs sauts, jusqu'à ce qu'ils arrivent à la destination (D).

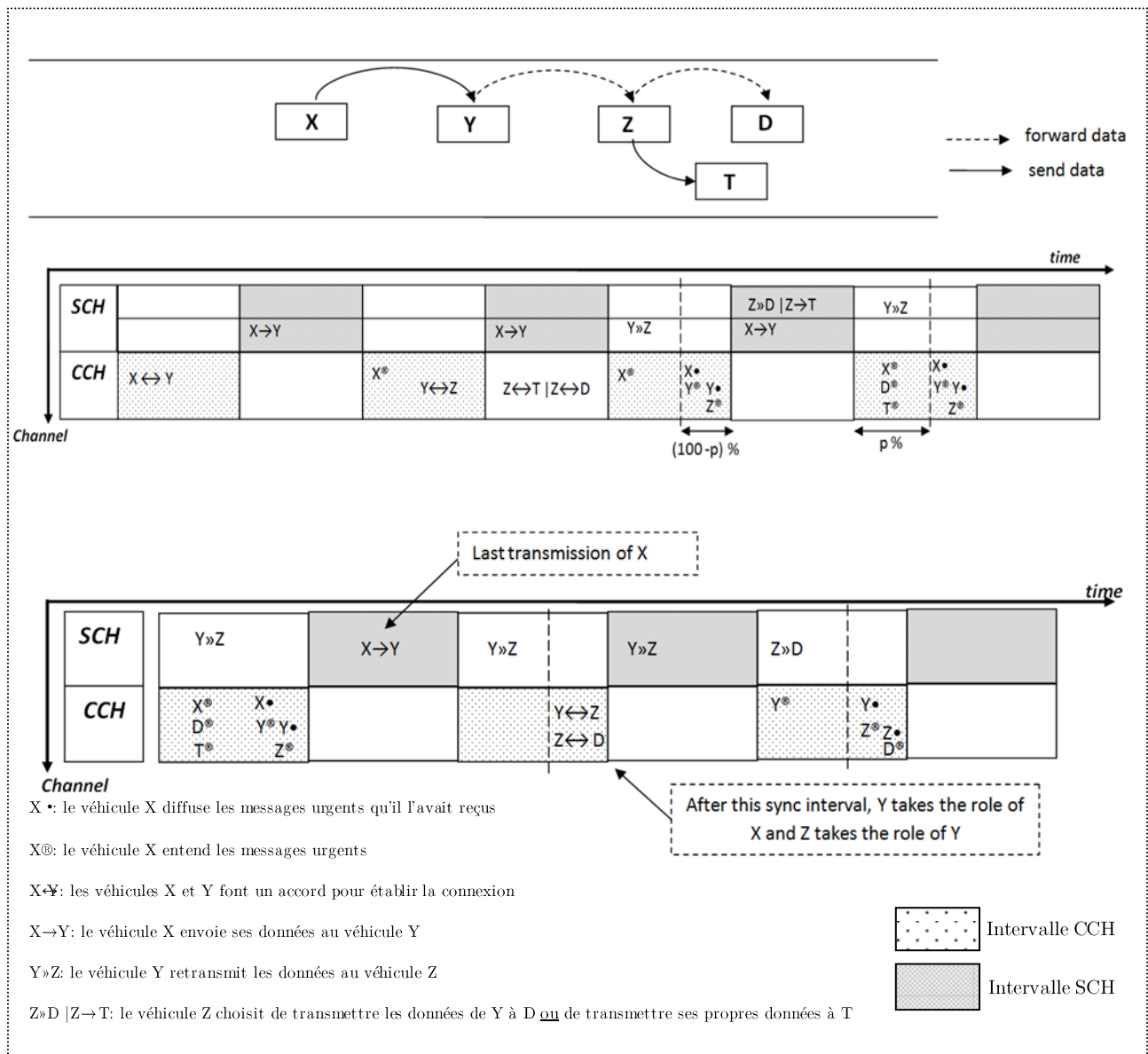


Figure III.8 Mécanisme de « Transmission en Chaîne »

Dans un régime normal, le véhicule X transmet tous ses paquets à un véhicule Y pendant plusieurs intervalles SCH. Après que la transmission soit terminée, le véhicule Y transmet les mêmes paquets au véhicule Z, et ainsi de suite. Notre idée est de profiter des intervalles «morts» (intervalles CCH) pour transmettre des données sur le SCH. La transmission des données est faite en mode parallèle et dans une chaîne de transmission périodique.

Revenons à la Figure III.8, le véhicule X (source) prend l'intervalle SCH pour transmettre des données au véhicule Y (relais) sur un canal SCH. Pendant l'intervalle de synchronisation suivant, X écoute le CCH. Y peut alors transmettre les mêmes données au véhicule Z (forward final). Pendant l'intervalle SCH, au moment où X transmet à Y sur un SCH, Z a la possibilité de transmettre les données de Y à la destination (D), ou il peut envoyer, en tant que source, d'autres données d'autres services à un nouveau véhicule (T).

Le principal problème ici, vient de ce que, quand X passe sur le CCH pendant l'intervalle CCH, les véhicules Y et Z ne le font pas mais alors ils ne peuvent plus recevoir les messages de sécurité routière ou de signalisation qui peuvent être transmis sur le CCH. Notre solution est alors de permettre à ces véhicules de rester un certain temps sur le SCH pendant l'intervalle CCH pour transmettre au suivant sur la chaîne les données de la chaîne, et après ce temps, ils repassent sur le CCH pour recevoir le bilan envoyé par X des messages passés sur le CCH. Ce bilan contient tous les messages de sécurité routière transmis dès le début de l'intervalle CCH. Une liste sur les états des canaux de service (occupés ou non) est également transmise pour aider les véhicules dans leur allocation des canaux au cours de l'intervalle SCH suivant. En outre, le véhicule X informe les membres de la chaîne sur la valeur du pourcentage de l'intervalle de CCH durant lequel ils peuvent rester sur le SCH. Ceci peut être utilisé pour s'adapter au contexte. Lorsque le trafic de données de sécurité routière est important, le temps de séjour sur le SCH pendant l'intervalle CCH doit être diminué pour laisser les véhicules de la chaîne recevoir tous les messages de sécurité routière. Inversement, si la charge des données de sécurité routière est faible, les membres de la chaîne peuvent bénéficier d'un temps important pour l'émission sur le SCH. La Table III.I décrit les rôles de chaque type des membres de la chaîne.

Table III.I. Le rôle des différents membres de la chaîne de transmission

Type du Véhicule	Intervalle SCH	1 ^{er} intervalle CCH	Reste des intervalles CCH	
			Avant p % de l'intervalle CCH	Après p % de l'intervalle CCH
source (X)	Transmettre les données à Y sur le SCH	Faire un accord avec Y	Ecouter les messages urgents et les parquets de signalisation	Rediffuser les messages urgents et délivrer un bilan contenant 'p' et les états des canaux
relais (Y)	Recevoir les données de X sur le SCH	[après accord avec X]: faire un accord avec un forward ou avertissement des nouveaux services sur le CCH	Transmettre ou acheminer des données sur le SCH	Retourner au CCH et commencer à écouter les messages urgents et les bilans de l'état des canaux (envoyés

			par X) et les rediffuser.
Forward final (Z)	- 1er intervalle SCH (après accord avec Y): faire un accord avec un forward ou avertissement des nouveaux services sur le CCH - intervalles SCH suivants: Transmettre ou acheminer des données sur le SCH	[après accord avec Y]: faire un accord avec un forward ou avertissement des nouveaux services sur le CCH	Recevoir les données de Y sur le SCH Retourner au CCH et commencer à écouter les messages urgents et les bilans de l'état des canaux (envoyés par Y) et les rediffuser.

Lorsque X termine sa transmission de données à Y, Y fait un autre accord avec Z, et Z fait un autre accord avec un nouveau relais ou avec la destination (D). Donc, Y transmet à Z sur le SCH pendant l'intervalle SCH, et écoute le CCH pendant l'intervalle CCH. Après p% de l'intervalle CCH, Y diffuse ses messages de sécurité routière. Au cours du p% de l'intervalle CCH, Z transmet à D sur le SCH, et après ce temps, il écoute les messages urgents sur le CCH.

III.4 Evaluation de performances

Le simulateur utilisé est le NCTUns 6.0. Il possède une implémentation complète des normes IEEE 1609 et 802.11p. Dans toutes les simulations faites, la route modélisée est celle d'une autoroute en ligne droite. Ses extrémités sont reliées en formant une boucle. Il n'y a pas de station de base (RSU), car seuls les véhicules (OBU) échangent des informations entre eux.

Tous les nœuds ont une portée de transmission maximale de 1000 m. Les paramètres de la couche MAC sont configurés selon les spécifications IEEE 802.11p, et sont résumés dans le tableau II. Le nombre de canaux est de 7 avec 1 canal de contrôle et de 6 canaux de service. Les arrivées de véhicules suivent un processus de Poisson. Tous les véhicules ont des antennes omnidirectionnelles. Le tableau III liste les paramètres de la simulation.

Table II. Paramètres de la couche MAC

aCWmin	$> = 15 \mu\text{s}$
aCWmax	$> = 1023 \mu\text{s}$
aSlotTime	$> = 13 \mu\text{s}$
aCCATime	$> = 8 \mu\text{s}$
aRxTxTurnaroundTime	$> = 2 \mu\text{s}$
aSIFSTime	$> = 32 \mu\text{s}$

aPreambleLength	$\geq 32 \mu\text{s}$
aPLCPHeaderLength	$\geq 8 \mu\text{s}$

Table III. Paramètres de simulation

Path loss model	Two-Ray Ground
Temps de simulation time	400 secondes
Nombre des simulations	10-50
Taux de transmission des données	6 Mbps
Tailles du message urgent	200-400 octets
Fréquence de génération par défaut du message urgent	10 Hz
Modèle de la route	Autoroute 2 voies, L=20 Km
Vitesse moyenne du véhicule	115 km/h
Vitesse maximale du véhicule	150 km/h

III.4.1 Mécanisme d'accès à canaux multiples opportuniste

La Figure III.9 présente le taux d'occupation du canal pour la sélection du canal pour la lorsque la liste des états des canaux maintenue par chaque véhicule est vide. Ce graphe permet donc d'évaluer la méthode d'affectation du canal par défaut décrite précédemment. Nous comparons notre approche avec deux autres méthodes. La première, que nous appelons « aléatoire », est telle que le numéro du canal est sélectionné au hasard parmi tous les SCHs. La seconde correspond à une sélection optimale dans le cas idéal où le véhicule connaît l'état instantané des SCHs. Notre mécanisme présente de meilleures performances par rapport au cas aléatoire et des résultats plus proches du régime optimal.

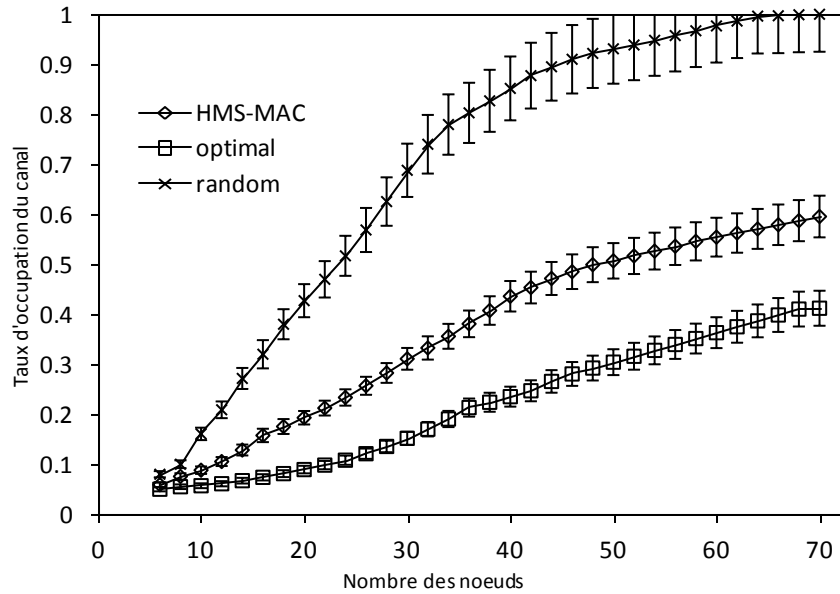


Figure III.9: Taux d'occupation du canal

La comparaison du taux d'occupation du canal pour les six canaux de service est indiquée sur la Figure III.10. On peut voir que notre proposition, comme les autres, a une répartition du taux d'occupation bien distribuée entre les canaux SCHs.

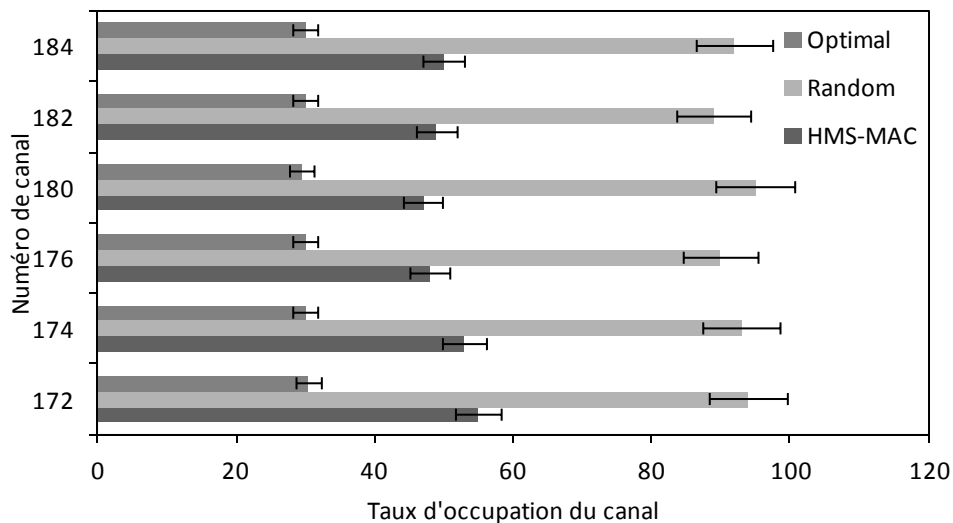


Figure III.10 Répartition du taux d'occupation entre les 6 canaux SCH

Sur la Figure III.11, nous pouvons voir la comparaison des performances entre les trois méthodes, en utilisant cette fois-ci la liste des états des canaux. Le schéma par défaut utilise des listes d'états qui ne sont pas mis à jour correctement en raison de la distorsion du signal et des autres sources de non réception de paquets. Notre mécanisme présente de meilleures

performances, proche de la solution optimale. Ceci est dû au fait que la zone sensible est relativement petite et donc la liste des états relativement à jour. Si le canal est occupé à la première tentative, le véhicule sélectionne un autre canal libre en fonction de sa table d'allocation (des canaux par défauts) et de sa liste d'états.

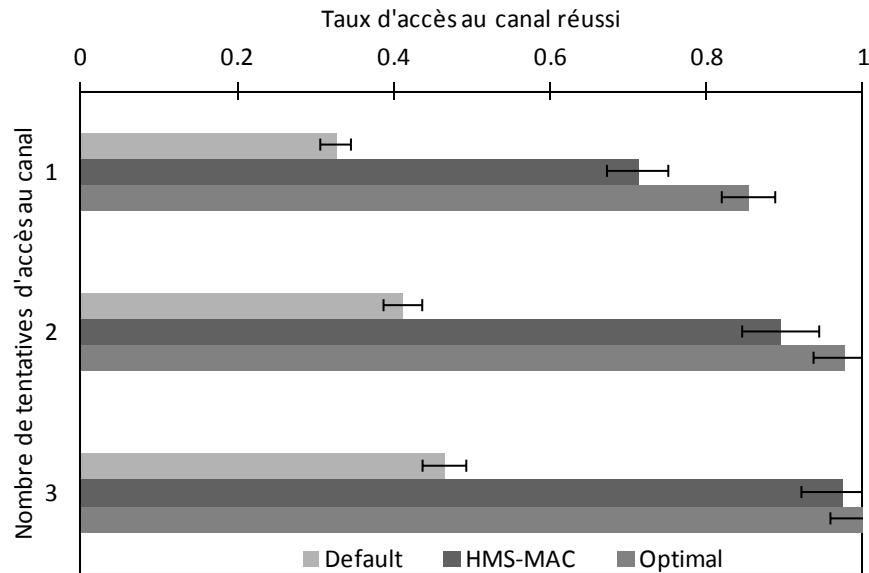


Figure III.11 : Taux d'accès au canal en utilisant la liste d'états des canaux

III.4.2 Accès immédiat au SCH basé sur l'écoute du canal (Listening-based Immediate SCH Access -LISA)

Pour étudier les performances de notre premier mécanisme LISA (un seul TLS), nous commençons par la sélection de la position optimale du TLS dans l'intervalle CCH.

Les Figure III.12 et Figure III.13 présentent l'influence de la position du TLS sur l'amélioration du taux d'utilisation du canal SCH. La Figure III.12 présente les meilleures positions TLS qui sont entre 30 et 35 ms. Ces valeurs sont obtenues par un compromis entre une bonne probabilité de transmission des messages de sécurité routière avant le TLS, et le nombre de slots laissés de l'intervalle CCH pouvant être utilisés sur le SCH.

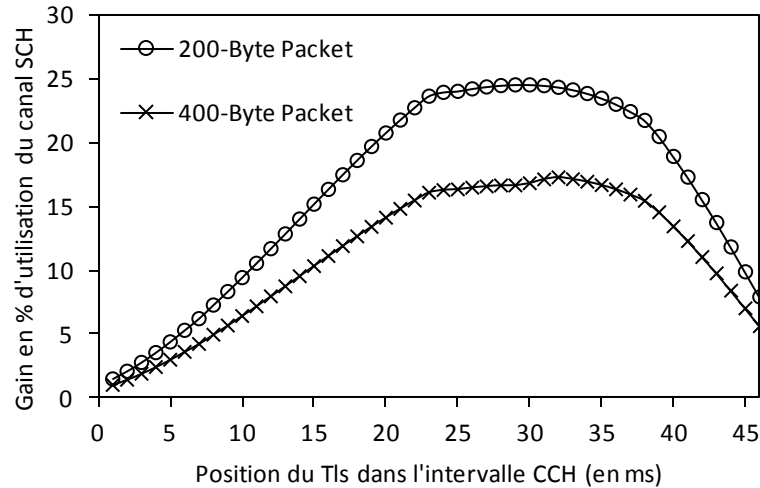


Figure III.12 : Gain d'utilisation du SCH avec le TLS, en fonction de la position du TLS

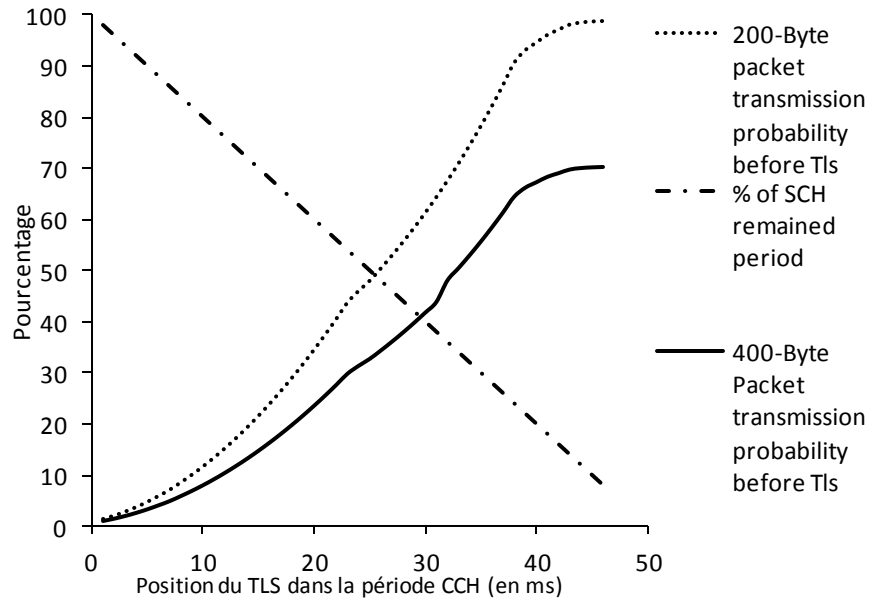


Figure III.13 : Sélection de la position du TLS

La Figure III.14 présente le gain d'utilisation du SCH en fonction de la fréquence de génération des messages urgents. Les meilleures positions du TLS utilisées y figurent également.

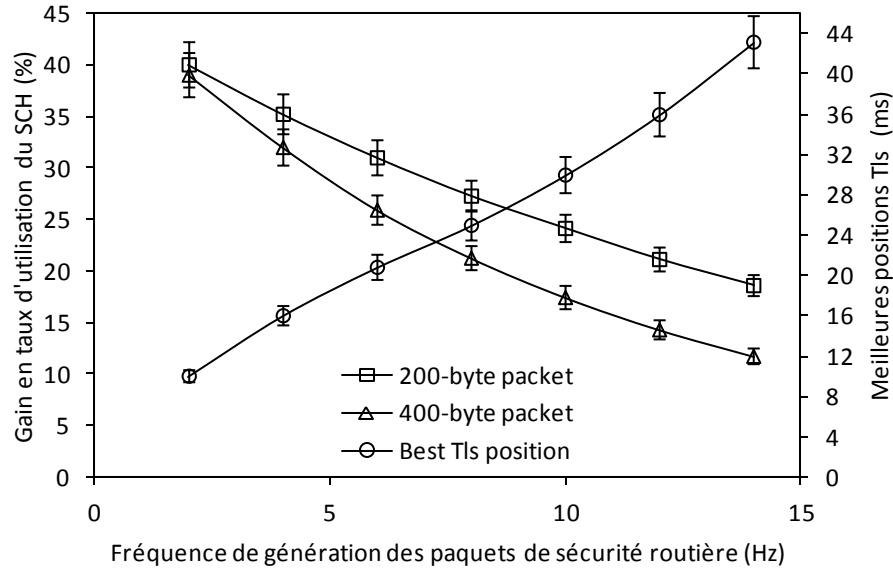


Figure III.14 : Performance en termes d'utilisation du SCH

Après avoir étudié le cas où seulement un intervalle TLS est utilisé, nous abordons le cas où deux intervalles TLS sont utilisés. Nous comparons les performances des messages urgents et non-urgents entre notre protocole et celui du WAVE, dans le cas (LISA 1-TLS) où un seul intervalle TLS, situé au début de l'intervalle de CCH, est utilisé, puis dans le cas (LISA 2-TLS) où un autre TLS, situé à la meilleure position (66% de l'intervalle de CCH), est ajouté.

Comme critères de performance, nous avons choisi le taux d'acheminement des paquets urgents (SPDR), défini comme la probabilité qu'un message de sécurité routière donné soit reçu par tous les véhicules dans la zone de couverture de transmission., ainsi que taux de transmission des paquets de données (DPDR) normalisé (rapporté au nombre maximum des paquets de données de service qui peuvent être transmis pendant un intervalle SCH). Notons que les paquets urgents sont dirigés par les événements : ils peuvent survenir à n'importe quel moment

Sur les Figure III.15 et Figure III.16, nous pouvons voir que le WAVE est toujours légèrement meilleur pour les messages de sécurité routière car tous les slots de l'intervalle CCH sont dédiés aux messages urgents et aux paquets de signalisation. L'utilisation d'une seule période d'écoute (TLS) au début d'intervalle CCH peut dégrader le SPDR. Cette dégradation est due au fait que les paquets « event-driven » peuvent être envoyés sans avertissement au cours du premier TLS, et donc perdus puisqu'il faudrait qu'ils fussent renvoyés après l'émission pendant le TLS qui ne sert qu'à dire qu'un envoi doit être fait mais qui ne sert pas à l'envoi lui-même. Ce problème est résolu par le deuxième TLS du mode LISA-2TLS. La Figure III.17 montre que notre protocole a

de meilleures performances pour le DPDR sur le protocole WAVE. Il s'agit d'une alternance de performance entre les deux régimes de LISA.

Parfois, un véhicule n'entend pas le signal pendant le premiers TLS, pour l'une des raisons déjà évoquées comme un problème d'atténuation de signal ou de volatilité de topologie, il reste ainsi sur l'intervalle SCH durant tout l'intervalle CCH. L'autre situation se produit quand un véhicule détecte un signal d'avertissement sur le premier TLS et n'entend pas ce signal pendant le deuxième TLS. Dans ce cas, ce véhicule passe au SCH pendant l'intervalle CCH restant.

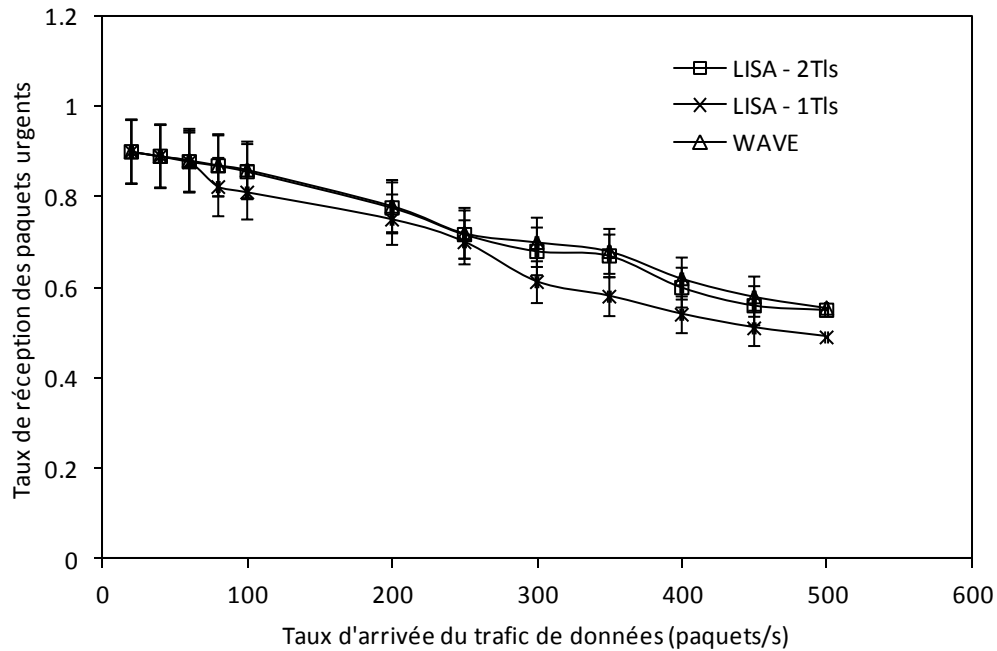


Figure III.15 : Taux de réception des paquets urgents (de fréquence 10Hz) en fonction du trafic de données arrivé

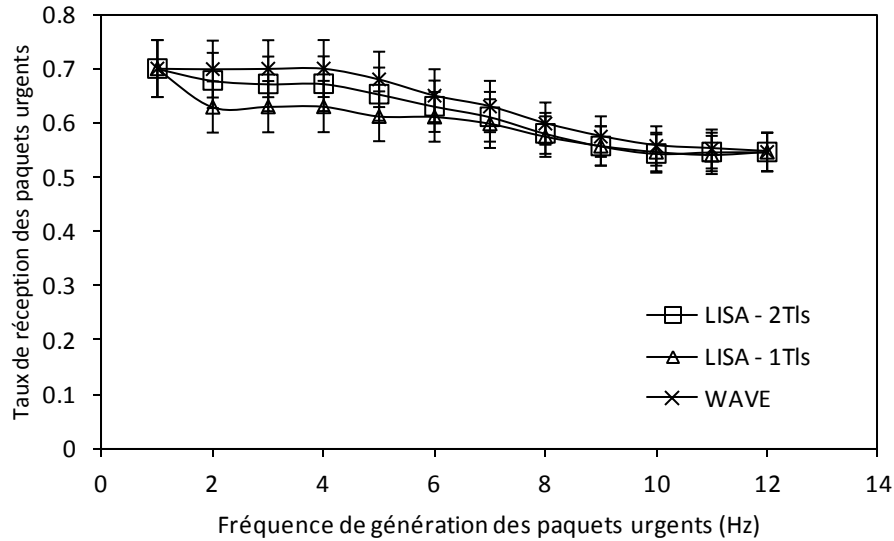


Figure III.16 : Taux de réception des paquets urgents en fonction de la fréquence de génération des paquets urgents

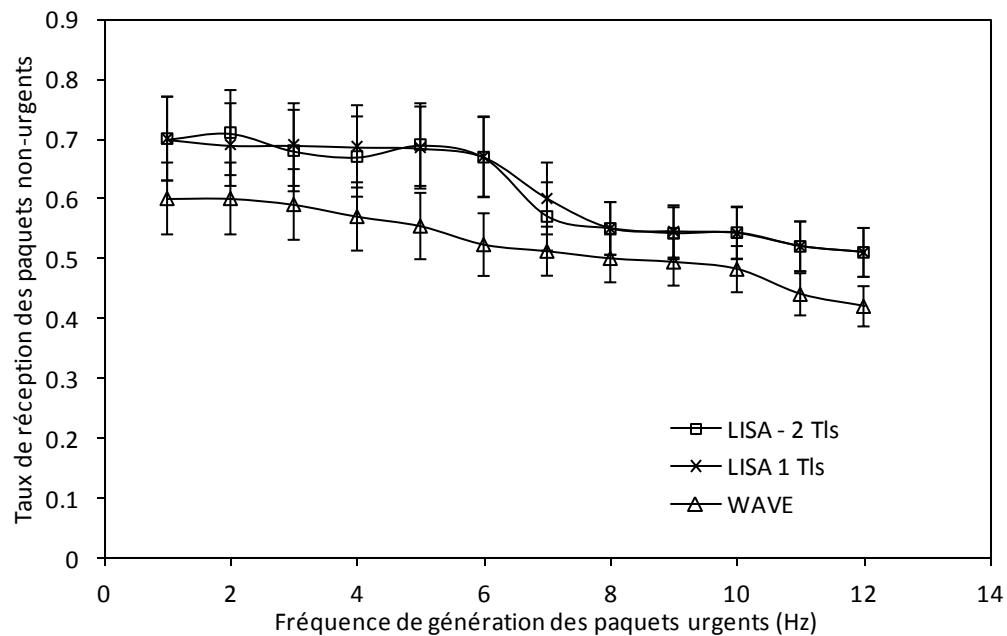


Figure III.17 : Taux de réception des paquets non-urgents dans le SCH en fonction de la fréquence de génération des paquets urgents

III.4.3 Chaîne de transmission périodique

Nous supposons que les paquets de signalisation sont de petite taille par rapport aux annonces WSA, et ils ne sont donc pas pris en compte dans la simulation. La durée sur le SCH au cours

de l'intervalle CCH est choisie de manière à ce que tous les paquets de sécurité routière transmis par la source soient complètement reçus par les membres de la chaîne. En d'autres termes, on reste sur le SCH tant qu'on n'a pas transmis toutes les données au suivant.

Les Figure III.18 et Figure III.19 présentent les performances de notre schéma, en termes de temps passé sur le SCH pendant les périodes CCH et de taux d'utilisation du SCH. L'augmentation du nombre de véhicules ou de la fréquence de génération des paquets urgents provoque une diminution du taux d'utilisation du SCH puisqu'elle nécessite de revenir plus tôt en fin de CCH pour recevoir les données envoyées en fin de CCH par la source et qu'elle a récupérées tout au long du CCH. Un paquet urgent de grande taille consomme plus de bande passante et il en résulte une diminution de la durée de temps qui est utilisée par les membres de la chaîne sur SCH, pendant l'intervalle CCH. C'est la même chose si le nombre de membres de la chaîne augmente.

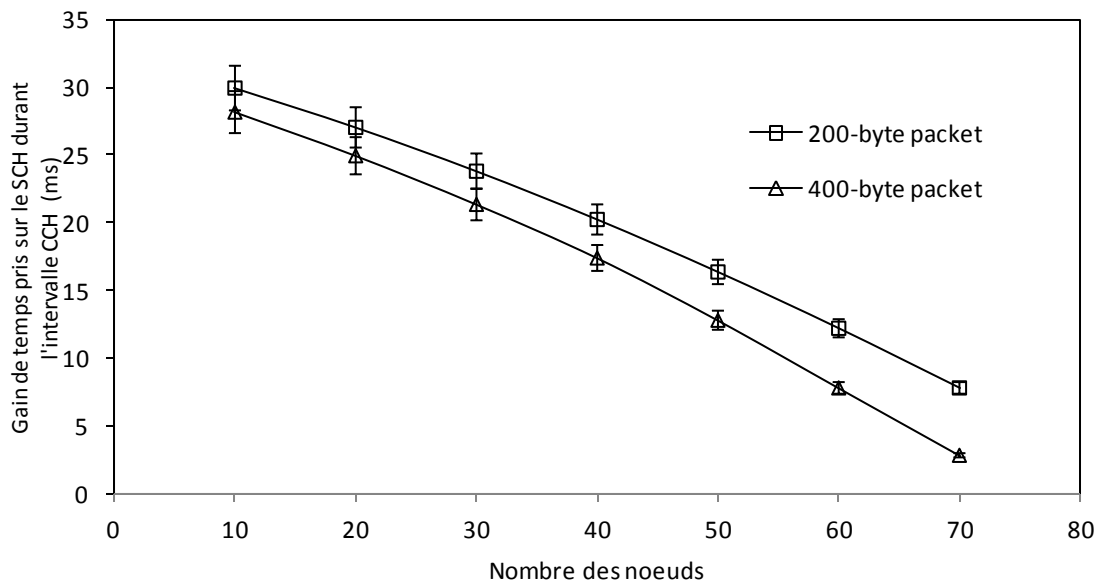


Figure III.18 : Temps moyen pris sur le CCH pour transmettre sur le SCH

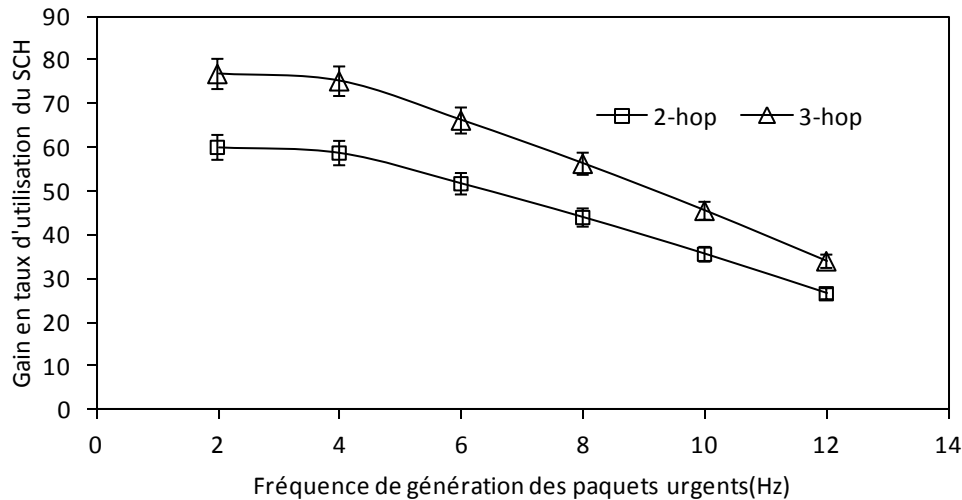


Figure III.19 : Amélioration du débit SCH en utilisant 2 et 3 sauts (3 et 4 véhicules par chaînes)

Dans la Figure III.20, nous varions le trafic des paquets de sécurité routière en prenant plusieurs formes du trafic (augmentation et chute) pour savoir son influence sur les performances du SCH dans notre système. Il peut être vu que le gain de l'utilisation du SCH augmente inversement proportionnel au trafic des paquets urgents. A l'intervalle CCH numéro 10, la charge des paquets de la sécurité routière augmente rapidement. Pendant l'intervalle 9, la source rapporte à un autre véhicule d'utiliser une longue durée de temps sur le SCH, en se basant sur le trafic faible détecté pendant cet intervalle. Et, comme c'est indiqué dans la figure, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation du SCH augmente aussi. Mais le problème ici est dans le rapport de réception de paquets de sécurité routière par les membres de la chaîne. Il sera très probable que ces véhicules ne peuvent pas recevoir tous les paquets de sécurité routière transmis par la source pendant une courte durée de temps. La solution à ce problème est de faire un compromis entre la durée et l'amélioration du SCH. Les véhicules ne doivent pas augmenter de façon spectaculaire la durée de temps sur SCH, anticipant à la situation lorsque la densité du trafic d'urgence peut soudainement augmenter.

La Figure III.21 montre que notre proposition satisfait les exigences de sécurité routière, et assure un bon taux de réception des paquets urgents, par rapport au WAVE. Dans notre mécanisme, ce taux peut diminuer si le nombre des membres de la chaîne augmente mais lentement.

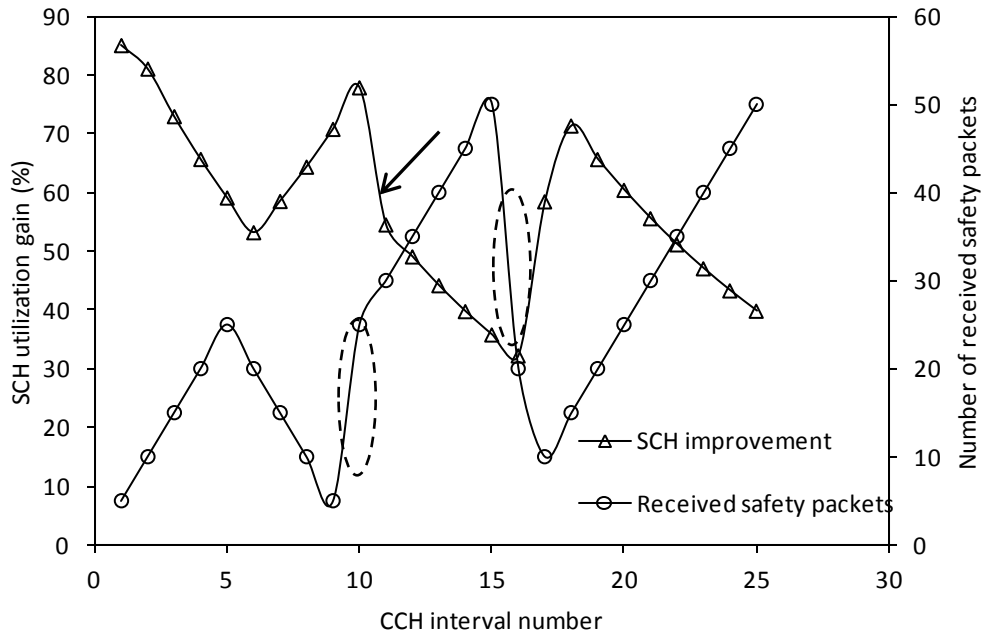


Figure III.20 : Variation du gain d'utilisation du SCH suite à une variation statique du trafic de sécurité routière

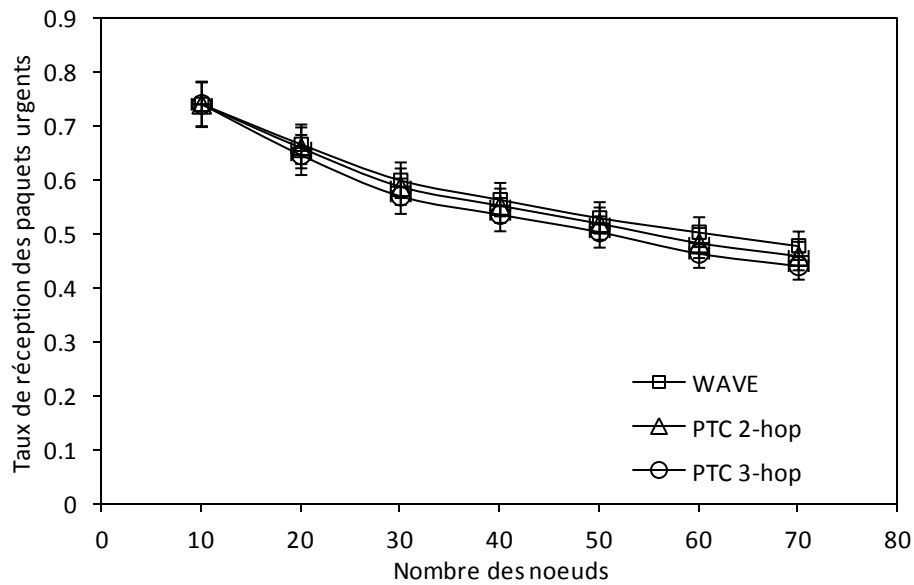


Figure III.21 Taux de réception des paquets urgents en fonction du nombre des nœuds

III.5 Conclusion

Les réseaux véhiculaires offrent la possibilité d'un accès dynamique à plusieurs canaux, ce qui permet d'augmenter la capacité du réseau mais pose plusieurs difficultés. Il faut d'abord

concevoir un mécanisme efficace, décentralisé et dynamique du choix des canaux. L'art n'est pas vide de propositions, soit venant des réseaux mobiles ad-hoc soit conçues spécifiquement pour les réseaux véhiculaires mais aucun auteur n'a vraiment songé à une approche opportuniste qui permette de gagner du temps dans ce contexte si volatile. C'est l'objet du premier mécanisme donné dans ce chapitre. Ensuite, avoir plusieurs canaux sur lesquels plusieurs utilisateurs émettent en même temps requiert d'avoir des points de synchronisation où tout le monde revient sur le même canal de contrôle pour recevoir le trafic destiné à tous, comme les données urgentes, notamment de sécurité routière, ou la signalisation mais ceci entraîne une mauvaise utilisation des autres canaux lorsque le trafic destiné à tous est peu important par rapport à la durée allouée au retour sur le canal de contrôle. Nous élaborons alors deux mécanismes qui permettent d'offrir un compromis entre réception des messages importants, tant de données que de signalisation, et augmentation du taux d'utilisation des autres canaux de données.

Dans notre premier mécanisme, appelé mécanisme d'accès à canaux multiples opportuniste, les canaux de service disponibles, et à utiliser par défaut lorsqu'on n'a pas d'information sur l'état des canaux dans un certain environnement, sont alloués aux véhicules en se basant sur leurs positions géographiques. Ils sont ensuite mis à jour à partir des balises d'allocation écoutées pendant l'intervalle CCH.

Les deux autres mécanismes traitent du problème de la commutation entre le CCH et le SCH afin d'optimiser le taux d'utilisation de l'ensemble des canaux réservés à ce système. Dans le premier, appelé LISA, les véhicules peuvent adapter les temps de synchronisation sur les canaux de contrôle en se basant sur l'annonce éventuelle qu'un trafic doit être émis sur le canal de contrôle, ce qui rend la durée passée dessus fonction de la charge des différents trafics de signalisation ou de données urgentes ou de sécurité routière. Ceci est géré par un intervalle de temps d'écoute à un instant approprié de l'intervalle CCH. Dans le deuxième (chaîne de transmission périodique), une chaîne de véhicules est créée pour diffuser les données et réutiliser le temps passé sur le canal CCH pour transmettre des données SCH. Alors que certains véhicules écoutent le CCH, d'autres transmettent leurs données sur le SCH. Les résultats des simulations montrent de bonnes performances pour les trois propositions, en termes de capacité du canal, de taux de réception de paquets, et de temps de réponse pour les paquets urgents et ordinaires.

Offrir un mécanisme MAC à canaux multiples permet d'augmenter la capacité du réseau, réduire le temps d'écoute inutile du canal de contrôle aussi, mais avoir des temps de retour périodiques sur le canal de contrôle introduit une synchronisation naturelle qui rend très

tentante l'émission par les nœuds n'ayant pas eu l'opportunité d'envoyer leur trafic de données qui s'est accumulé pendant l'intervalle d'écoute du canal de contrôle de l'envoyer en tout début de période SCH, provoquant des phénomènes de collisions, ou d'inhibition. C'est l'objet du chapitre suivant, de proposer une méthode qui permette de gérer au mieux la façon dont on choisit ses instants d'émission de données dans les périodes autorisées.

Chapitre IV. Diffusion des paquets sur le canal de contrôle dans l'IEEE 1609.4

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau mécanisme MAC pour la diffusion des messages suivant la norme IEEE 802.11p/WAVE pendant les périodes CCH. Nous considérons deux problèmes qui conduisent au même résultat indésirable: la dégradation des performances du canal de contrôle. Le premier problème est lié au contrôle de congestion. Il s'agit d'adapter le mécanisme de backoff à la diffusion des messages. Il est évident que le back-off exponentiel n'est pas efficace dans les cas de trafic de diffusion et l'envoi des balises. Le problème devient plus difficile lorsque ces balises ont une date d'expiration et qu'elles sont supprimées une fois si ce temps est atteint avant la transmission. Lorsque la densité des véhicules est élevée, la probabilité d'avoir deux ou plusieurs véhicules ayant les mêmes temps aléatoires de back-off augmente résultant en une augmentation de la probabilité de collision. Une solution consiste à incrémenter la fenêtre de contention (CW), mais alors le temps d'attente avant de transmettre augmente et il en résulte une élévation du taux d'abandon dû à la date d'expiration. L'absence d'accusé de réception pour les messages de diffusion rend l'adaptation de CW très difficile. Notre mécanisme proposé répond à ce problème.

Ce chapitre aborde aussi la question du phénomène de la congestion des canaux suite à un changement de canal (du SCH à CCH) mentionné à l'annexe B de la norme IEEE 1609.4- 2010. Juste après un changement périodique de canal, un grand nombre de dispositifs WAVE se trouvent dans une période de congestion du canal au-dessus de la moyenne (above-average), conduisant à un taux de collisions élevé.

Dans ce chapitre, nous présentons une approche aidant les émetteurs à éviter la contention de début de période, en particulier pour une densité élevée de véhicules. Notre mécanisme ventile les dates du début de la transmission entre les véhicules pour leur donner la possibilité de diffuser leurs messages en répartissant au mieux les instants d'émissions dans la période courante, tout en évitant la suppression des paquets par la date d'expiration. Nous montrons également que la procédure de back-off utilisée dans le standard n'est pas adaptée pour les

messages diffusés sur le CCH. Enfin, nous montrons que l'utilisation d'un CW initial minimum dans une procédure de back-off un peu modifiée, et après réduction de la densité des transmissions sur l'intervalle CCH grâce à notre ventilation des instants de transmission sur l'intervalle CCH, est une solution efficace pour diminuer la probabilité de collision et augmenter le taux de réception des paquets. Dans notre backoff modifié, au lieu d'arrêter le compteur lorsque le canal est occupé, on continue malgré tout à le décrémenter.

Dans le paragraphe suivant, les travaux antérieurs sont passés en revue. La troisième partie présente notre approche, et dans la quatrième nous en présentons l'évaluation des performances. La dernière conclut ce chapitre.

IV.2 Travaux antérieurs

Une hypothèse commune, comme dans [CV⁺11], est de supposer que, au début de chaque intervalle CCH, chaque véhicule a un paquet (balise ou WSA) prêt à être transmis et la date d'expiration de la balise et des trames WSA est délimitée par un intervalle CCH. Après cet intervalle, les paquets non transmis sont supprimés. En général, la transmission d'un paquet peut échouer à cause: (i) des collisions avec d'autres nœuds qui ont la même date de back-off, ou (ii) de l'abandon des paquets obsolètes en raison d'un délai de back-off qui n'est pas nul à la fin de l'intervalle CCH.

La question de trouver la bonne valeur pour la CW initiale du backoff est discutée dans la littérature. Il semble que cela dépende du type de trafic: pour le trafic unicast, l'objectif est de maximiser le débit, alors qu'il est pour le trafic de diffusion de réduire au minimum la probabilité de collision. L'augmentation de la CW initiale peut être bonne pour le trafic unicast, mais mauvaise pour la diffusion. Les auteurs de [RE⁺11] concluent que la valeur initiale de CW fixée à 15 et proposée dans la norme IEEE 802.11p, fonctionne de manière significative et dans presque toutes les circonstances étudiées.

Actuellement, la plupart des articles traitant les questions de backoff dans VANETs mentionnent que la CW_{min} proposée dans la version actuelle de la norme (entre 5 et 15) est loin d'être optimale [SCB11, CV⁺11]. Des chercheurs tentent de trouver un moyen dynamique pour adapter cette valeur. Dans [SCB11], les auteurs mettent l'accent sur les applications de sécurité routière qui utilisent un faible trafic de données pour étendre la connaissance du conducteur sur l'environnement véhiculaire. Pour limiter les pertes de données dues aux dates de péremption, ils proposent de diminuer la fenêtre de contention initiale après chaque paquet abandonné en raison du délai d'expiration.

Dans d'autres publications (par exemple [DC⁺10, JF10]), on essaie d'ajuster la CW_{min} en fonction de la densité des véhicules, en supposant que l'estimation de la durée des périodes de collision peuvent être faite de quelque manière. Dans [BA⁺11], les auteurs adaptent le temps de back-off en fonction de la densité des véhicules qui est estimée en utilisant une fonction qui calcule la distance entre les véhicules dans une zone de transmission donnée. Comme mentionné dans [SCB11], cette hypothèse est très difficile pour les messages de diffusion parce qu'il n'y a pas de méthode efficace pour séparer en temps réel entre la collision de l'erreur de propagation (il n'y a pas d'Acks pour le trafic de diffusion).

L'estimation de la densité de véhicules est aussi utilisée dans [SCB11b], mais les auteurs proposent d'adapter le seuil de détection de la porteuse pour augmenter la probabilité de réception. Lorsque la densité est faible (resp. élevée), l'émetteur choisit un faible (resp. grand) seuil à partir duquel un grand (resp. petit) nombre de nœuds sont écoutés et donc la probabilité que le canal soit occupé est élevée (resp. faible). Cela amène à une lente (resp. rapide) diminution du compteur de back-off. Ce mécanisme conduit à adapter le temps de back-off en fonction de la densité des véhicules. En s'appuyant sur la densité des véhicules, quelle que soit la précision de son estimation, ne résout pas totalement le problème dans le cas de diffusion dans VANETs puisque même à une densité moyenne, il peut y avoir une charge importante de données.

La partie importante dans la norme IEEE 1609.4 est le mécanisme de changement ou de commutation de canal. Cependant, l'un des attributs négatifs de ce régime est le gaspillage de bande passante. Avoir deux intervalles, un pour le CCH et l'autre pour le SCH, amène à diminuer la capacité du CCH à sa moitié. Toutes les communications de sécurité routière doivent être transmises pendant l'intervalle CCH. Dans la norme, l'intervalle de synchronisation est défini à 100 ms de durée. Un intervalle de garde de 4 ms est situé au début de chaque intervalle de canal, de sorte que chacune de ces durées devient 46 ms. Ainsi, la charge peut-elle atteindre souvent la capacité. Par exemple, avec un lien de 6Mbps, un intervalle CCH de 46ms et un message de 400 octets, seulement 86 messages peuvent être envoyés, ce qui correspond à 43 véhicules par voie sur une route à deux voies, si chacun est prêt à envoyer un message sur le CCH. Cela revient au même que d'avoir une densité de 43 véh./voie/km (la portée de communication pour chaque véhicule peut atteindre 1000m). Cependant, la densité moyenne du véhicule est comprise entre 25 et 31 véh./km/ voie tandis que la densité d'embouteillage est habituellement de plus de 115 véh./km/voie (cf. [TRB00]). Bien sûr, la fréquence des messages doit être prise en compte, mais certaines applications nécessitent une densité de messages très

élevée et, en cas de situations d'urgence comme les accidents, des cascades de messages sont envoyées aux moments où les embouteillages apparaissent.

Cette limitation de la capacité rend nécessaire d'utiliser un mécanisme plus efficace pour minimiser la probabilité de collisions entre les véhicules.

IV.3 Mécanisme proposé: Schéma de Dispersion et d'Ecoute pour la diffusion dans les réseaux véhiculaires

IV.3.1 Approche avec le back-off standard

Nous proposons un mécanisme à deux volets. Tout d'abord les nœuds, avant le début de chaque intervalle CCH, sont rapidement « dispersés » sur l'intervalle CCH : on associe à leur position géographique un instant dans l'intervalle CCH. Chaque nœud est équipé d'un calendrier des instants contenant une mise en correspondance entre les secteurs géographiques et les numéros des slots associés sur l'intervalle CCH (Figure IV.1). La méthode pour la génération de ce calendrier est décrite dans la partie suivante. Ce mécanisme n'alloue pas aux véhicules de slot d'émission à proprement parler, mais il écarte les instants de départ des transmissions des nœuds sur l'intervalle CCH. Il aide à résoudre le problème du phénomène de congestion à la suite d'un changement de canal et permet aux émetteurs d'éviter la contention de début d'intervalle. Dans la procédure du back-off aléatoire standard, les véhicules peuvent sélectionner les mêmes compteurs. En revanche, notre proposition tend à minimiser totalement la probabilité d'avoir deux ou plusieurs véhicules sélectionnant le même temps de back-off. Son objectif est de minimiser la probabilité de collisions qui peuvent survenir pendant l'intervalle CCH.

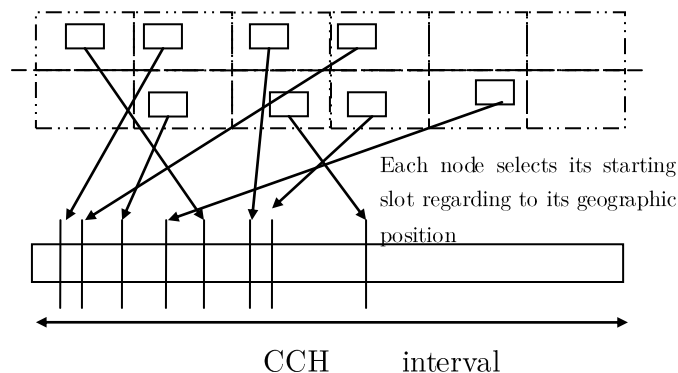


Figure IV.1: Les véhicules sont « dispersés » d'une manière aléatoire dans le temps en utilisant un calendrier.

Pendant l'intervalle CCH, chaque nœud cherche à transmettre son paquet au numéro de slot associé à sa position géographique. Pendant cette phase, la procédure de back-off est utilisée

pour réduire au minimum le nombre de collisions entre plusieurs messages diffusés. Chaque véhicule, avant de transmettre son message, appelle la procédure de back-off avec la fenêtre de contention minimale (CW_{min}). Le véhicule démarre une temporisation de back-off qui est tirée d'une distribution uniforme sur l'intervalle $[0, CW_{min}]$. Ce compteur est décrémenté à chaque slot uniquement si le canal est libre pendant ce slot, sinon, il est bloqué. Lorsque le compteur atteint zéro, le véhicule diffuse son message. Cette phase vise à réduire plus la probabilité de collision dans le cas où deux ou plusieurs véhicules ont le même identifiant de secteur géographique et, par conséquent, ils doivent attendre la même durée. La CW minimale est utilisée pour maximiser le taux de réception des paquets et en même temps diminuer le taux d'abandon des paquets en raison de la date de péremption. La taille de CW_{min} en slots (entre 5 et 15) est statique parce qu'il n'y a pas de retour à partir de messages de diffusion pour indiquer si une transmission défectueuse s'est produite et, par conséquent, de modifier la valeur de la CW .

Cette phase de détection est très importante dans la façon dont elle minimise la probabilité de collision dans le cas où deux ou plusieurs véhicules peuvent être situés dans le même secteur géographique. Cela peut être causé par une grande taille de secteur contenant de nombreux véhicules, ou encore par les erreurs de position GPS qui peuvent faire que deux ou plusieurs véhicules se perçoivent comme étant dans un même secteur.

IV.3.2 Approche avec une nouvelle technique de back-off

Toutefois, la procédure du backoff standard, qui oblige le nœud à bloquer le compteur si le canal est occupé, entraîne un gaspillage de temps qui pourrait être utilisé par ce véhicule pour diffuser son message. Cet effet est très problématique dans le CCH, qui déjà, comme on vient de le voir, est exposé au problème de saturation même dans le cas d'un trafic routier normal. Pour faire face à ce problème, nous proposons un mécanisme simple pour adapter la procédure de back-off. Chaque véhicule démarre un compteur de manière uniforme tiré dans l'intervalle $[0, CW_{min}]$. Ce compteur est décrémenté après chaque slot, que le canal soit libre ou pas. Quand il arrive à zéro, le véhicule écoute le canal pendant un slot. Si celui-ci est libre, il peut transmettre son paquet, sinon, il reprend la même procédure et déclenche un nouveau compteur.

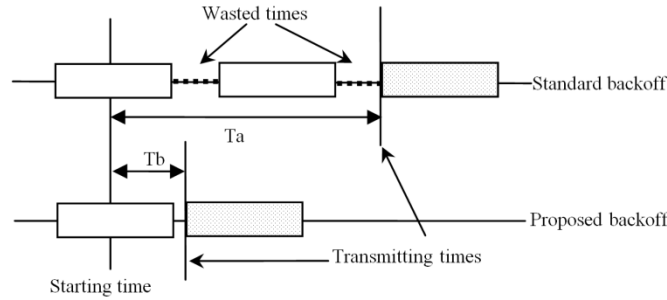


Figure IV.2: Procédures de backoff: standard et celle proposée.

Le comportement de ce mécanisme est illustré sur la Figure IV.2. Le nœud qui utilise la norme backoff doit attendre une longue durée (T_a) avant de pouvoir transmettre son paquet.

Cette longue durée n'est plus justifiée si les instants de transmissions des paquets sont assez bien répartis sur l'intervalle CCH. Le temps entre les paquets, causé par le compteur de backoff, est du temps perdu et entraîne une augmentation de la contention entre les paquets non-transmis. Ce temps est réduit au minimum dans notre mécanisme. Au cours du temps T_b , le nœud peut avoir déclenché plusieurs compteurs. Enfin, il peut immédiatement transmettre son paquet quand il perçoit que le canal est libre pendant un slot. En bref, dans notre mécanisme, le véhicule doit avancer pendant l'intervalle CCH à petits pas et convergents pour arriver à un emplacement libre où il peut diffuser son message.

IV.3.3 Le calendrier des dispersions

Chaque véhicule possède un équipement de positionnement, comme le GPS, et peut obtenir des informations de position en temps réel. Le calendrier des dispersions est défini comme la fonction qui attribue à chaque secteur un slot de temps unique. Cette fonction de mise en correspondance réutilise les affectations d'intervalles de temps sous la contrainte que deux secteurs dans une même couverture de transmission ne se voient pas attribuer le même slot. Cette zone de couverture est égale à deux fois la portée de transmission pour faire face au problème de terminal caché.

La surface, comme dans [BE07], est discrétisée en N secteurs numérotés, chacun d'entre eux contenant au plus un véhicule. Les N slots sont mis en correspondance avec ces secteurs un par un. Le calendrier des dispersions, façon de diffuser les numéros de slots sur les secteurs, est important pour faire une répartition géographique équitable. Une méthode simple consiste à générer une séquence aléatoire de N nombres entre 1 et N et d'associer chaque numéro à un secteur (Figure IV.3).

Chaque secteur géographique a son propre numéro de slot. Avant le début de l'intervalle CCH, chaque nœud calcule sa position géographique à l'aide des données GPS. Avec le calendrier des dispersions, il peut savoir dans quel secteur il est, et donc savoir à partir de quel slot il peut commencer sa transmission. Avec un récepteur GPS précis, chaque véhicule reçoit une position géographique qui est différente de ses voisins. Toutefois, les GPS précis, souhaitables pour traiter les erreurs du GPS, sont coûteux. Dans la section suivante nous prenons en compte l'effet des erreurs de positionnement donnés par les récepteurs GPS.

15	48	31	3	50	4	38	32	27	17	39	19	14	16	45	2	13	25	22	29	34	41	20	10	9
5	28	40	36	37	21	46	1	23	47	18	49	33	12	35	26	11	44	6	30	8	42	43	24	7

Figure IV.3: Calendrier des dispersions: un exemple d'association aléatoire des dates de transmissions avec les secteurs géographiques.

IV.3.4 Erreurs GPS

Dans les réseaux VANET, pour assurer la localisation, chaque véhicule est équipé facilement d'un récepteur GPS. Toutefois, les signaux GPS ne sont pas toujours disponibles et les GPS peuvent ne pas être assez robustes pour certaines applications. Il y a quelques facteurs qui influent sur la qualité du signal GPS et provoquent des erreurs de calcul [OW10]:

- Perturbations de l'ionosphère et de la troposphère;
- Réflexion du signal ;
- Erreurs d'éphémérides;
- Erreurs d'horloge;
- Visibilité des satellites;
- Ombrage par satellite;
- La dégradation intentionnelle.

Les récepteurs GPS classiques ont une erreur de localisation de $\pm 10\text{m}$ ([GOC]). Un aspect positif de ces erreurs, est qu'elles sont corrélées : les récepteurs GPS voisins ont tendance à avoir la même erreur de localisation orientée dans le même sens ([OW10], [KE06]).

IV.3.4.1 Covariance et Corrélation

Soient X_1 et X_2 deux variables aléatoires. La covariance et la corrélation de X_1 et X_2 sont définies par :

$$\text{Cov}(X1, X2) := E[X1 X2] - E[X1]E[X2]$$

$$\text{Corr}(X1, X2) = \rho(X1, X2) \frac{\text{Cov}(X1, X2)}{\sqrt{\text{Var}(X1)\text{Var}(X2)}}$$

Supposons maintenant que $X = (X1, \dots, Xn)$ est un vecteur aléatoire. Alors Σ , la matrice de covariance de X , est la matrice de $(n \times n)$ qui possède les éléments (i, j) donnés par $\Sigma_{i,j} := \text{Cov}(Xi, Xj)$.

○ *Propriétés de la matrice de covariance Σ*

1. Elle est symétrique, $\Sigma^T = \Sigma$.
2. Les éléments de la diagonale vérifient $\Sigma_{i,i} \geq 0$.
3. Elle est semi-définie positive, d'où $x^T \Sigma x \geq 0$ pour tout $x \in \mathbb{R}^n$.

Maintenant nous allons voir comment générer les variables aléatoires normales corrélées.

IV.3.4.2 Génération des variables aléatoires normales corrélées

Le problème est de générer $X = (X1, \dots, Xn)$ où $X \sim \text{MN}(0, \Sigma)$ (loi multi-normale). Remarquons qu'il est facile de résoudre ce problème quand $E[X] \neq 0$. On suppose les Zi suivre une loi gaussienne centrée réduite $N(0, 1)$ et indépendantes et identiquement distribuées pour $i = 1, \dots, n$. Alors $C1 Z1 + \dots + cn Zn$ suit une loi $N(0, \sigma^2)$ avec $\sigma^2 = c1^2 + \dots + cn^2$. La combinaison linéaire des variables normales aléatoires est encore normale. Plus généralement, soit C est une matrice $(n \times m)$ et soit $Z = (Z1 Z2 \dots Zn)^T$. Alors $C^T Z$ suit une loi $\text{MN}(0, C^T C)$. Donc notre problème se réduit à chercher C tel que $C^T C = \Sigma$. Pour trouver cette matrice C , il faut calculer la décomposition de Cholesky de Σ .

○ *Décomposition de Cholesky d'une matrice symétrique définie positive*

Cette matrice peut être écrite comme $M = U^T D U$, où U est la matrice triangulaire supérieure et D une matrice diagonale avec des éléments de diagonale positives. La matrice variance-covariance Σ , est symétrique définie positive, nous pouvons alors écrire :

$$\Sigma = U^T D U,$$

$$\Sigma = (\sqrt{D} U)$$

$$\Sigma = (U^T \sqrt{D})(\sqrt{D} U)$$

$$\Sigma = (\sqrt{D} U)^T (\sqrt{D} U)$$

La matrice $C = \sqrt{D} U$ vérifie alors $C^T C = \Sigma$. Elle est connue par la décomposition de Cholesky de Σ .

IV.3.4.3 Génération des vecteurs d'erreur GPS (E_i)

Comme dans [MH10, KE06], la corrélation entre deux vecteurs est exprimée en utilisant une forme normalisée de la covariance entre E_i et E_j : les coefficients de corrélation (ρ_{ij}). Lors de la construction de C_e , nous supposons que tous les coefficients de corrélation sont égaux pour toutes les paires de véhicules:

$$\rho_{ij} = \begin{cases} \rho & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

Une fois que les coefficients de corrélation sont déterminés, la matrice de covariance C_e pour un écart type σ donné peut être construite comme suit:

$$C_e = \begin{pmatrix} \sigma^2 & \rho\sigma^2 & \dots \\ \rho\sigma^2 & \sigma^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (1)$$

Les vecteurs E_i satisfaisants C_e , donnée dans l'équation 1, peuvent être générés comme suit:

1. Pour K véhicules, générer K vecteurs indépendants qui suivent la distribution normale $N(0,1)$ et les insérer dans les lignes de la matrice $X = [X_1 X_2 \dots X_k]^T$. Étant donné que ces vecteurs sont générés de façon indépendante, leur coefficient de corrélation est égal à 0. De plus, si les vecteurs sont suffisamment longs, leurs variances deviennent approximativement égale à 1. En conséquence, la matrice de covariance C_x entre les lignes de X devient:

$$C_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} = I$$

2. Pour les variables aléatoires normales multi-variées, la transformation linéaire des variables aléatoires originales produit un nouvel ensemble de variables dont la matrice de covariance C' devient $C' = LC_x L^T$ où L est la matrice de transformation linéaire dans $E = LX$. Nous utilisons cette propriété des variables aléatoires normales multi-variées afin de générer un ensemble de vecteurs d'erreurs. Puisque la matrice de covariance C_x à l'étape 1 est I , le résultat de la transformation linéaire donne :

$$C' = L I L^T = L L^T \quad (2)$$

3. En utilisant l'équation 2, nous pouvons trouver la matrice de transformation appropriée L qui transforme C_x en C_e ($C_e = LL^T$). Notons que C_e est notre matrice de covariance cible et elle peut être décomposée en matrices triangulaires inférieures (L) et supérieures (L^T) en utilisant la factorisation de Cholesky si elle est semi-définie positive.
4. Une fois la matrice de transformation linéaire obtenue à l'étape 3, multiplier la matrice avec pour obtenir les vecteurs d'erreur GPS corrélés (E_i).

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11}X_1 + L_{12}X_2 + L_{13}X_3 & \cdots \\ L_{21}X_1 + L_{22}X_2 + L_{23}X_3 & \cdots \\ L_{31}X_1 + L_{32}X_2 + L_{33}X_3 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

Nous supposons que dans le cas général, un véhicule dans le secteur (0,0) peut recevoir des données GPS erronées qui le localisent dans son secteur réel ou dans l'un des secteurs de ses quatre voisins (voir Figure IV.4). La Figure IV.5 représente l'effet de corrélation de trois vecteurs d'erreur, en traçant chaque vecteur par rapport aux deux autres, en trois dimensions. Il est évident que si ces vecteurs ne sont pas corrélés, les résultats de cette figure doivent être des points épars indépendants.

IV.4 Evaluation de performances

Pour évaluer les performances, nous comparons trois mécanismes: le backoff standard, notre mécanisme où un slot initial est choisi durant le CCH en se basant sur la position géographique avec notre mécanisme de nouveau backoff proposé dans la section III.2, et un troisième mécanisme où le slot initial est choisi d'une manière uniforme sur l'ensemble des slots du CCH avec notre nouveau mécanisme de backoff. Toutes les simulations sont mises en œuvre en utilisant MATLAB. Les paramètres MAC sont fixés selon la norme IEEE 802.11p, et les paramètres de simulation sont présentés dans la Table IV.II.

	(-1,1)	(0,1)	(1,1)	
(-2,0)	(-1,0)	(0,0)	(1,0)	(2,0)
	(-1,-1)	(0,-1)	(1,-1)	

Figure IV.4: Les 15 secteurs voisins dans une route à 3 voies. Les zones pointillées représentent les possibilités des secteurs calculés au lieu du secteur (0,0).

Pour montrer les performances de notre système, nous avons d'abord étudié l'effet des erreurs du GPS. Il semble que, même en tenant compte des erreurs du GPS, la probabilité de collision

entre les slots au bout desquels commence le backoff, est plus petite dans le cas de notre mécanisme basé sur la position géographique que dans le cas d'une sélection aléatoire uniformément établie. Pour étudier l'effet des erreurs GPS, nous générons des vecteurs d'erreur corrélés. Puis nous calculons la probabilité d'avoir un ou plusieurs véhicules de différents secteurs ayant le même secteur correspondant (calculé en utilisant le GPS et le calendrier des dispersions) avec le véhicule de secteur $(0, 0)$ (Table IV.I).

Table IV.I. Exemple des secteurs interférant avec le secteur N°0

Secteur	Secteurs interférant avec le secteur $(0,0)$
$(0,0)$	$(0,0)$ $(0,1)$ $(0,-1)$ $(-1,0)$ $(1,0)$
$(-1,1)$	$(0,1)$ $(-1,0)$
$(-1,0)$	$(0,0)$ $(-1,0)$
$(-1,-1)$	$(0,-1)$ $(-1,0)$
$(-2,0)$	$(-1,0)$
$(0,1)$	$(0,1)$ $(0,0)$
$(0,-1)$	$(0,-1)$ $(0,0)$
$(1,1)$	$(0,1)$ $(1,0)$
$(1,0)$	$(0,0)$ $(1,0)$
$(1,-1)$	$(0,-1)$ $(1,0)$
$(2,0)$	$(1,0)$

La première chose que nous étudions est la possibilité que chaque véhicule sélectionne son slot au début de l'intervalle CCH. Il est évident que cette étape supplémentaire va diminuer la pression sur le premier slot du CCH. Cependant, la façon d'attribuer chaque slot est une question importante. Nous comparons notre approche à celle attribuant un numéro de slot aléatoire, indépendant de la localisation géographique. Dans les deux approches, les slots sont sélectionnés entre 0 et $S < S_{max}$, nombre maximum de slots dans un intervalle CCH. Comme on peut le voir sur la Figure IV.6, la probabilité de coïncidence entre les véhicules, lorsqu'on utilise la position géographique, est meilleure que celle obtenue par le régime aléatoire.

C'est normal puisque, avec le schéma aléatoire, un ou plusieurs véhicules peuvent choisir le même numéro de slots. Cette collision peut également être observée dans notre cas, mais seulement entre les voisins, et dans une mesure très faible. Ce phénomène est dû à des erreurs de GPS. Il est faible puisque les vecteurs d'erreur GPS sont corrélés. En outre, il est évident que lorsque la précision du GPS est élevée, la probabilité d'interférence entre les véhicules diminue.

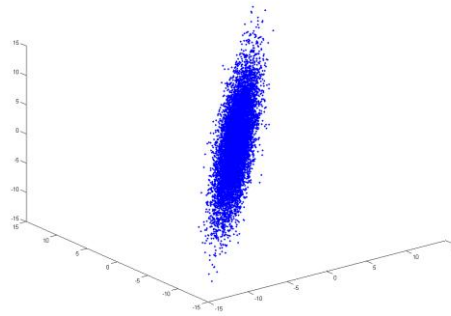


Figure IV.5: Trois vecteurs corrélés.

Table IV.II. Paramètres de simulation

Parametre	Valeur
Type de la route	Autoroute
Nombre des voies/route	3
Taille du secteur	10mx5m
Déviatiion standard (σ)	15
Coefficient de Correlation (ρ)	0.95
Erreur de position par GPS	[-10m ,10m]
Couverture de transmission	up to 1000 m

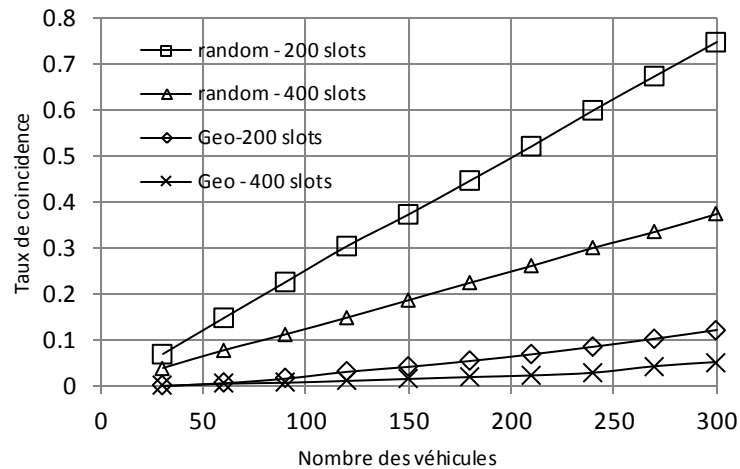


Figure IV.6: Taux de coïncidence en fonction du nombre des véhicules

L'étape suivante consiste à appliquer le mécanisme proposé dans un environnement véhiculaire avec différentes densités de trafic routier. Notre objectif est d'étudier l'effet de notre approche sur la procédure de back-off. Nous comparons la probabilité de perte de paquets entre le back-off standard et notre nouveau back-off avec l'utilisation de notre proposition d'affectation de slots basée sur la position géographique (notée « Geo »). Nous avons également observé les performances dans le cas où le slot où commence le backoff est choisi aléatoirement et uniformément.

Les résultats de l'analyse des performances par simulation sont tracés Figure IV.7 pour différentes valeurs de CW avec différents nombres de nœuds. Rappelons-nous que dans le cas de la diffusion, il n'y a pas d'accusé de réception et, dans ce cas, la fenêtre de contention n'est pas modifiée et toujours égale à CW_{min} . Comme on le voit dans la section II, la plupart des travaux récents montrent que la CW_{min} utilisée par la norme n'est pas optimale. Comme le montre la figure, les performances de notre proposition sont meilleures que celles de la norme avec le mécanisme d'affectation aléatoire des slots de transmission dans le CCH. Par ailleurs, dans notre cas, la fenêtre de contention minimale utilisée comme valeur par défaut pour l'envoi des balises est la valeur la plus adéquate. Comme mentionné précédemment, l'augmentation de la valeur de CW augmente le délai d'attente qui se traduit par une augmentation de la probabilité de perte de paquets due à la date de péremption du paquet.

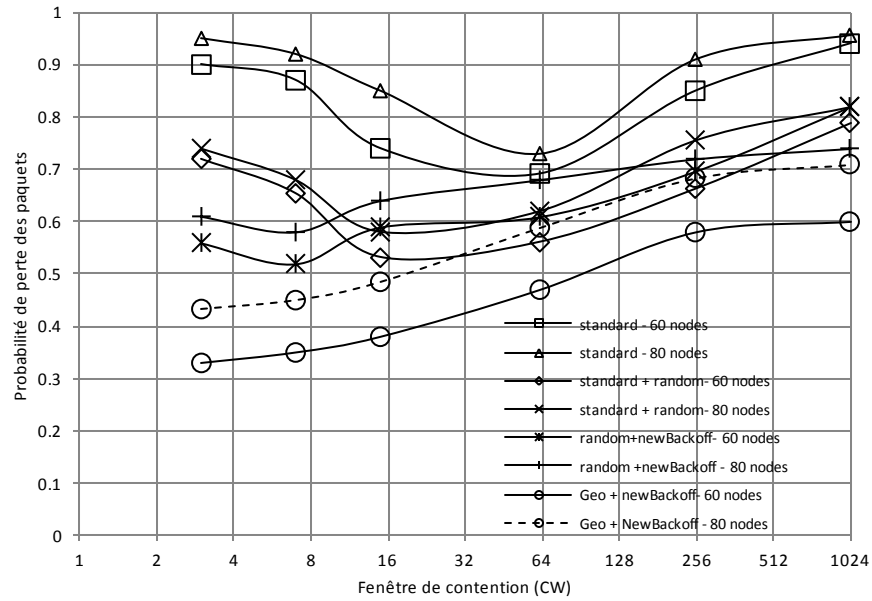


Figure IV.7: Probabilité de perte des paquets pour différentes valeurs de CW et nombres des nœuds

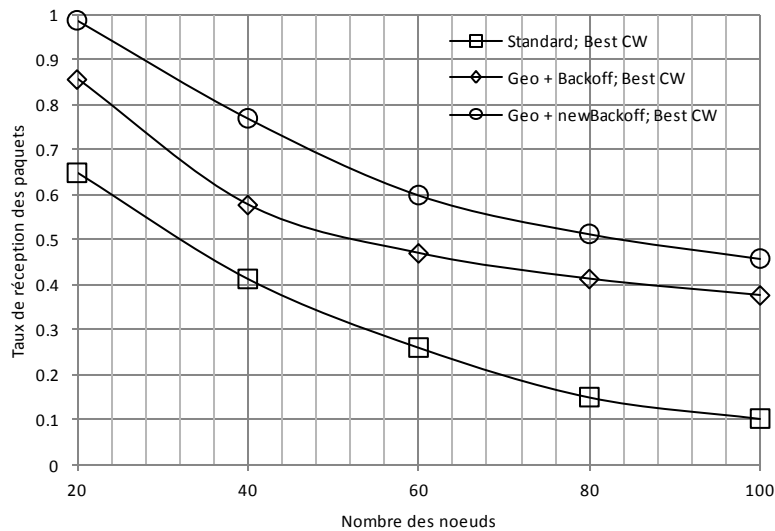


Figure IV.8: Taux de réception des paquets en fonction du nombre des nœuds.

Sur la Figure IV.8, les performances de notre mécanisme en termes de taux de réception de paquets en fonction du nombre de véhicules en contention sont présentées. Les valeurs optimales de CW sont prises pour chacun des trois mécanismes. Comme on le voit dans cette figure, notre nouveau mécanisme de back-off présente de meilleures performances par rapport à celle du back-off utilisé dans le standard IEEE 802.11p.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche pour soulager la charge de trafic véhiculaire au début de l'intervalle CCH. Elle est principalement conçue pour le trafic de diffusion avec date de péremption fixe. Les nœuds commencent leur back-off à un moment fonction de leur position géographique. Nous comparons notre mécanisme avec le standard et dans le cas où les slots sont choisis de manière uniforme sur l'intervalle CCH. En outre, nous proposons une nouvelle procédure de back-off par laquelle un nœud peut diffuser son paquet dès que possible après un petit retard aléatoire uniforme.

Les résultats des simulations indiquent que notre approche offre les meilleures performances en termes de capacité du canal et de probabilité de collision. Nous montrons également que la valeur minimale de la fenêtre de contention de la norme dans le mécanisme de back-off est la plus adéquate pour diffuser des messages sur CCH avec date de péremption. Enfin, notre système permet de résoudre un problème important sur la capacité du canal CCH avec simplicité et sans avoir besoin d'échange d'informations entre les véhicules.

Le problème de collision entre les paquets diffusés par les véhicules, surtout sur le canal CCH, est atténué mais n'est pas totalement supprimé. En effet, la charge des messages diffusés par les véhicules dans une zone de couverture de 1000 m peut dépasser la capacité du canal CCH limité par la durée des intervalles CCH de 46 ms. C'est dans le chapitre suivant que nous proposons une solution à ce problème par une approche de codage réseau analogique.

Chapitre V. Codage réseaux

Dans les réseaux véhiculaires, les techniques visant à éviter les interférences en utilisant des méthodes d'allocation et d'ordonnement montrent vite leurs limites, notamment à cause de la grande volatilité des topologies. Dans un réseau à haute densité où les nœuds peuvent avoir une large couverture de communication, la capacité du canal peut être insuffisante pour supporter tous les messages de diffusion, même s'ils sont parfaitement ordonnancés. C'est le cas du canal de contrôle (CCH) dans la norme IEEE 1609.4 pour l'accès sans fil dans les environnements véhiculaires (WAVE). Dans le cas des messages de diffusion, il n'y a pas d'accusé de réception et par suite pas de retransmission. De surcroît, l'existence d'une date de péremption des messages de sécurité pousse chaque véhicule à diffuser son message le plus tôt possible, pas au-delà de l'intervalle CCH.

Pour faire face à ces problèmes, nous proposons une nouvelle approche qui sépare deux messages en collision au niveau signal. Notre méthode, techniquement basée sur le codage réseau analogique (ANC, [KGK07]), ressemble plus par son effet à la technique de décodage ZigZag ([GK08]). En effet, le mécanisme ZigZag a pour effet de séparer deux paquets interférés sans nécessiter d'avoir au préalable l'un des deux, ce qui est nécessaire dans le cas du codage analogique. Cependant, ZigZag nécessite au moins deux retransmissions des paquets en collision, tandis que notre technique repose sur une seule transmission, de même que l'ANC. On peut donc voir notre proposition comme un ZigZag proactif, ce qui est particulièrement bien adapté au trafic véhiculaire car il faut transmettre très vite dans ce contexte, ce qui est le cas lorsqu'aucune retransmission n'est nécessaire, d'une part et, d'autre part, dans le cas du trafic diffusé, il n'y a pas de retransmission et donc l'utilisation de ZigZag n'est pas possible. Il y a en revanche un coût supplémentaire qui est d'ajouter deux symboles pour chaque couple de symboles successifs du signal transmis. Ce coût n'est pas très cher en termes de bande passante puisque les messages diffusés sur le CCH ont de petites tailles. Lorsque la charge de trafic est faible, doubler la taille des messages n'a pas beaucoup d'importance sur les performances du réseau et, lorsqu'elle devient importante, il s'avère que notre technique permet bien d'améliorer le débit utile malgré le coût supplémentaire. De plus, alors que l'ANC fonctionne uniquement avec une modulation différentielle, notre mécanisme est adaptable aux

technologies qui utilisent la modulation PSK. Les résultats des simulations montrent une haute performance de notre mécanisme en termes du taux de réception des paquets et de capacité du canal. Dans le reste de ce chapitre, nous présentons dans un premier temps une introduction au codage réseau, suivie d'une description plus détaillée des mécanismes ANC et ZigZag avec un aperçu des travaux antérieurs. Un exemple de scénario et la méthode proposée sont ensuite décrits. Enfin, notre mécanisme est évalué par simulation dans un contexte véhiculaire et plus précisément de communications véhicule-à-véhicule (V2V). La dernière partie conclut ce chapitre.

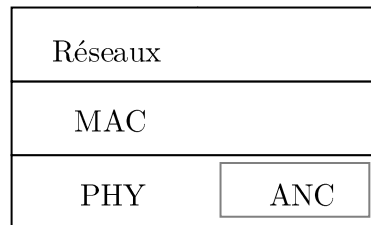
V.1 Introduction au Codage Réseaux

De nombreux protocoles ont été proposés ces dernières années pour exploiter les avantages du codage de réseau. Ces protocoles ciblent les environnements avec et sans fil, et les modes de communication aussi bien unicast que multicast. Ils sont applicables à plusieurs niveaux allant de la couche physique jusqu'à la couche transport et application. Ils peuvent être rétro-compatibles ou non (en fonction des couches qu'ils affectent), ont différents niveaux de complexité, et exploitent le codage réseau à des degrés divers (dans les opérations de codage permises et les domaines utilisés).

1. Le codage réseau inter-session : comme le Codage Réseau Analogique [KGK07], le COPE [KRH⁺06], NoCoCo [SHC07], etc. Ces protocoles recodent les paquets de flux distincts localement au niveau des nœuds émetteurs, et exploitent la nature de diffusion locale (broadcast) de la transmission sans fil.
2. Le codage réseau intra-session : comme MORE [CJJK07], MIXIT [KKBM08], etc. Dans ces protocoles, seuls les paquets appartenant à la même session sont recodés ensemble. Pour les deux types de codage réseau inter- et intra-session, le mode de communication supporté est l'unicast, typiquement en utilisant les transmissions sans fil avec pertes. Le codage réseau Intra-session peut être utilisé avec les transmissions multi-chemins.

Dans notre étude on s'intéresse au codage réseau analogique et au mécanisme ZigZag [GK08]. Ce dernier ne tombe pas dans la catégorie des protocoles de codage réseau. Il utilise des techniques semblables à l'ANC par la méthode de décodage de signaux superposés sur le support physique. Il est applicable à des réseaux sans fil quelconques, pas seulement pour ceux qui utilisent le codage réseau.

V.2 Description du mécanisme de Codage Réseau Analogique



Le codage réseau analogique fonctionne au niveau de la couche physique. L'opération de codage proprement dite est en fait réalisée par le médium lui-même: les deux signaux « codés » sont en fait superposés sur le médium et un récepteur mesure directement la superposition de signaux que l'on considère sous forme complexe, d'où la réception de la somme sur \mathbb{C} des signaux envoyés. Dans le document [KGK07], les auteurs proposent ainsi une méthode pour réduire le nombre des slots utilisés pour le transfert de paquets en utilisant des propriétés physiques du support sans fil. Un exemple typique d'application est le cas où deux flux se croisent à un nœud.

Plus précisément, deux nœuds (Alice et Bob) veulent transmettre des paquets l'un à l'autre, mais ils ne sont pas en visibilité directe. Ils ont toutefois tous les deux un nœud «relais» sous leur couverture commune. C'est ce qu'on appelle la « topologie Alice-Bob » (Figure V.1). Dans l'approche traditionnelle de communication (Figure V.2), il faut quatre slots pour assurer l'échange des deux paquets. Lorsqu'on utilise le codage «numérique» (Figure V.3), l'opération n'en nécessite plus que trois: les deux nœuds transmettent leurs paquets respectifs l'un après l'autre et, ensuite, le relais diffuse un XOR des paquets. Chacun des récepteurs connaissant le paquet qu'il a envoyé peut inverser la fonction de XOR pour déterminer celui envoyé par l'autre. Avec le codage réseau analogique (ANC) (Figure V.4), seuls deux slots sont nécessaires: (1) les deux nœuds transmettent à peu près au même moment, et (2) le relais diffuse le paquet qu'il a reçu (la somme des deux signaux physiques) sans chercher à le décoder. Normalement, un tel paquet reçu au niveau du relais est classé comme «collision» et est ignoré mais, avec le codage analogique, chaque nœud connaissant le paquet qu'il a envoyé peut le soustraire au signal reçu pour en déduire le paquet envoyé par l'autre et qui s'est superposé au sien.

Un autre exemple d'application concerne la topologie en chaîne (Figure V.5) où les nœuds à deux sauts interfèrent. Selon l'approche traditionnelle, la transmission d'un paquet nécessite trois slots pour traverser trois sauts vers la destination (Figure V.6). Dans le cas d'un flux unidirectionnel de paquets, l'utilisation de l'ANC peut améliorer le débit d'un facteur 1.5 (Figure V.7).

Une troisième topologie d'application possible est la topologie en « X » (Figure V.8), qui se compose de deux sources S1 et S2 envoyant à deux destinations D1 et D2 à travers un relais R qui amplifie les transmissions en "collision". D1 peut entendre S2 et D2 peut entendre S1. En utilisant les transmissions du relais, les destinations peuvent décoder les paquets qui les intéressent en soustrayant les paquets directement entendus.

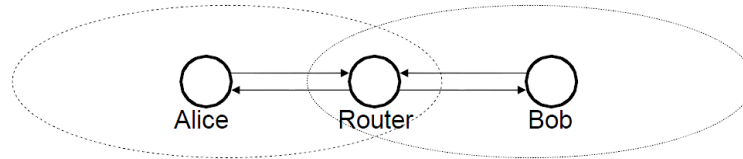


Figure V.1 : Topologie Alice-Bob. Les lignes pointillées représentent les couvertures radio.

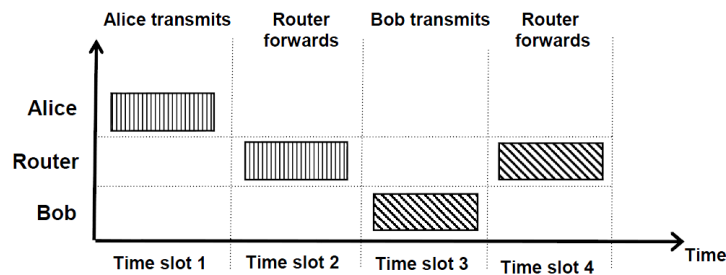


Figure V.2: Approche traditionnelle pour une topologie Alice-Bob.

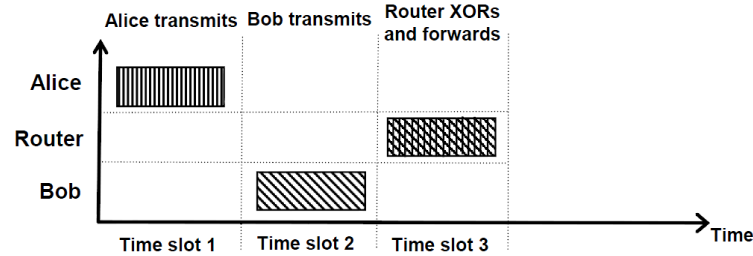


Figure V.3: Codage réseaux numérique pour une topologie Alice-Bob.

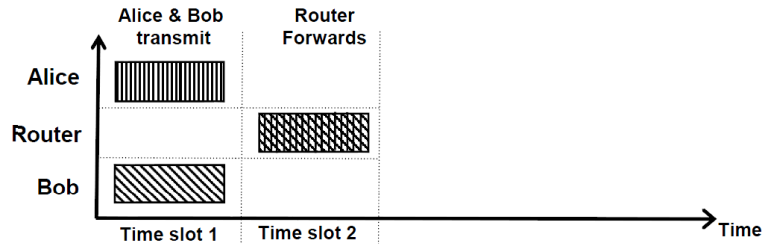


Figure V.4: Codage réseaux analogique pour une topologie Alice-Bob.

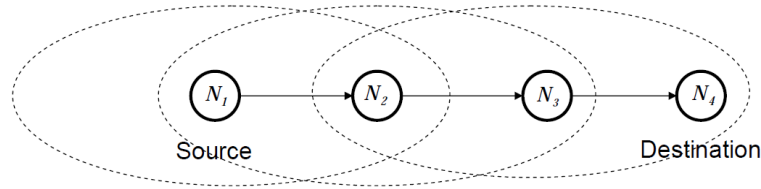


Figure V.5: Topologie en chaîne.

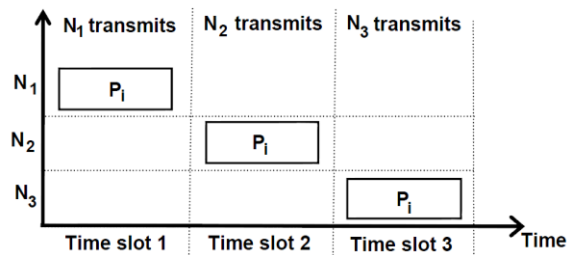


Figure V.6: Approche traditionnelle pour une topologie en chaîne.

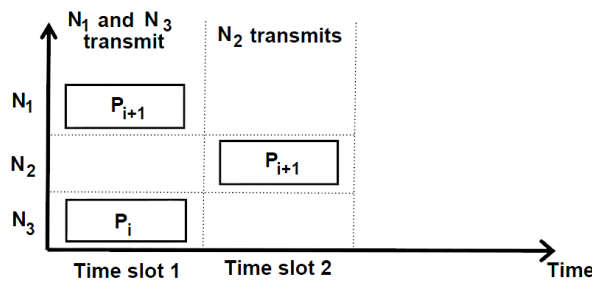


Figure V.7: Codage Réseaux Analogique pour une topologie en chaîne.

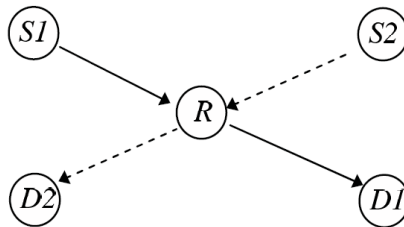


Figure V.8: Topologie en « X ». Deux flux croisant par un nœud R.

Ci-dessous, nous donnons une description plus détaillée du protocole ANC.

Un signal radio transmis par un émetteur est représenté par $s[n] = A_s[n]e^{i\theta_s[n]}$, où $A_s[n]$ est l'amplitude et $\theta_s[n]$ la phase du nième échantillon. La modulation MSK est utilisée. Cette modulation fait correspondre « 1 » à une différence de phase de $\frac{\pi}{2}$ et « 0 » à une différence de phase de $-\frac{\pi}{2}$.

Au niveau du récepteur, le signal reçu prend cette forme : $y[n] = hA_s[n]e^{i(\theta_s[n]+\gamma)}$.

Calculer la différence de phase entre le n ème et le $(n+1)$ ème échantillon se résume à calculer l'argument du rapport $r = \frac{y[n+1]}{y[n]} = e^{i(\theta_s[n+1]-\theta_s[n])}$. À cause du bruit, $\arg(r)$ ne prend pas les valeurs exactes de $\frac{\pi}{2}$ et $-\frac{\pi}{2}$. Par conséquent, un argument positif est traduit à « 1 » et celui négatif à « 0 ».

L'ANC vise à décoder les signaux interférés de deux sources:

$$y[n] = y_A[n] + y_B[n] = h'A_s[n]e^{i(\theta_s[n]+\gamma')} + h'B_s[n]e^{i(\phi_s[n]+\gamma'')}.$$

Notons que dans la topologie « Alice and Bob », Alice reçoit $y[n]$ et connaît $s[n]$. La question est de savoir comment décoder les différences de phase dans le signal de Bob. En notant $A = h'A_s[n]$, $B = h'B_s[n]$, $\theta[n] = \theta_s[n] + \gamma'$, $\phi[n] = \phi_s[n] + \gamma''$, $\mu = \frac{1}{N} \sum_n |y[n]|^2$ et $D = \frac{|y[n]|^2 - A^2 - B^2}{2AB}$, le système suivant suffit à Alice pour récupérer les bits de Bob :

$$\theta[n] = \arg\left(y[n](A + BD \pm iB\sqrt{1-D^2})\right) \quad (1)$$

$$\phi[n] = \arg\left(y[n](B + AD \pm iA\sqrt{1-D^2})\right) \quad (2)$$

$$A^2 + B^2 = \mu \quad (3)$$

$$A^2 + B^2 + 4AB/\pi = \frac{2}{N} \sum_{|y[n]|^2 > \mu} |y[n]|^2. \quad (4)$$

L'équation (3) est vraie pour une séquence de bits aléatoire. Donc, les émetteurs utilisent une séquence pseudo-aléatoire pour laquelle ils font un XOR avec les bits à envoyer. Les récepteurs effectuent l'opération de XOR des bits reçus avec la même séquence, et par suite récupèrent ainsi les bits envoyés. Puisque les équations (1,2) possèdent deux paires de solutions $((\theta_1, \phi_1)$ et (θ_2, ϕ_2)), Alice utilise sa connaissance de $\theta_s[n]$ pour sélectionner la solution correcte. En d'autres termes, pour sélectionner les paires correctes des différences

$$(\Delta\theta_{kl}[n], \Delta\phi_{kl}[n]) = \theta_k[n+1] - \theta_l[n], \phi_k[n+1] - \phi_l[n], \text{ avec } k, l \in \{1, 2\},$$

la paire (k, l) minimisant l'erreur $|\Delta\theta_{kl}[n] - \Delta\theta_s[n]|$ est sélectionnée.

Plusieurs problèmes pratiques sont étudiés et décrits dans l'article proposant l'ANC. Premièrement, la détection du début d'une interférence est faite par la mesure de la variance de l'énergie du signal reçu. L'absence d'une interférence se traduit par une petite variance (idéalement 0). L'interférence casse cette propriété du signal.

Deuxièmement, l'absence de synchronisation est traitée par la fixation de la taille des paquets. Les paquets sont bourrés avec une séquence prédéfinie de bits appelée « séquence pilote » (la séquence à la fin de chaque paquet est la séquence miroir de celle du début du paquet). Les quelques bits au début ou à la fin de la transmission ne subissent pas d'interférence pour l'un au moins des deux paquets interférents, et ils sont utilisés pour détecter l'alignement des paquets d'Alice et Bob. En réalité, une légère désynchronisation est encouragée, c'est pourquoi les nœuds commencent leur transmission après un délai aléatoire.

En outre, le décalage de fréquence Δf dû aux limitations des oscillateurs, provoquant un décalage de $2\pi\Delta f\Delta t$ dans les différences de phases (Δt étant la période d'échantillonnage), est pris en considération. La séquence pilote est choisie d'une manière telle que la moyenne des différences de phase transmises est nulle. Ainsi, Δf est estimée en mesurant la différence de phase de la partie non interférée de la transmission.

Dans la littérature, on a discuté sur la faisabilité pratique de cette solution, notamment à cause de la distorsion du canal et du décalage de l'échantillonnage. Dans [KGGK07], les auteurs déploient l'ANC dans un testbed de trois nœuds, en utilisant une implémentation sur *Software Defined Radio* (SDR). La solution de radio logicielle GNURadio est utilisée avec un débit de 500 kb/s. Le rapport signal sur bruit est de 20-30 dB. Le système utilise l'*Universal Software Radio Peripheral* (USRP) avec des cartes filles (daughterboards) RFX2400.

Le gain observé en termes de débit dans la topologie Alice-Bob est d'environ 30% par rapport à COPE et de 70 % par rapport à l'approche traditionnelle. Pour des flux unidirectionnels dans la topologie en « X », une amélioration de 36% est observée par rapport à l'approche traditionnelle.

V.3 Algorithme de décodage ZigZag

Zigzag est un nouveau mécanisme pour les récepteurs 802.11 qui peut décoder les collisions. Sa conception vise à résoudre les problèmes de terminaux cachés dans les WLANs. Les avantages de ZigZag s'étendent aux réseaux maillés, où la possibilité d'avoir des récepteurs capables de décoder les collisions peut permettre des transmissions simultanées concurrentes et donc une grande réutilisation spatiale.

La conception de ZigZag permet de tirer profit au maximum des signaux reçus: en l'absence de collision, il agit comme les récepteurs 802.11 actuels, mais quand des collisions se produisent, il essaie de les décoder. Il est évident qu'il existe des scénarios où le décodage d'une collision peut échouer, mais, puisque ZigZag n'introduit pas de trafic supplémentaire dans les cas

d'absence de collision, sa présence peut seulement augmenter le débit du WLAN. Quand il y a collision, il utilise le fait que le paquet est retransmis et, au lieu de jeter celui qui a subi une collision, il l'utilise avec tous les autres qu'il reçoit.

ZigZag peut résoudre un grand nombre de modèles de collision. L'idée principale de son algorithme de décodage est de trouver un morceau de paquet qui n'a pas interféré avec d'autres, et qui est exploité pour démarrer le processus de décodage. Une fois le décodage démarré, ce processus est itératif et, à chaque étape, il produit un nouveau morceau non interféré et décodable en utilisant les décodeurs standards.

Par exemple, ZigZag peut décoder le modèle de collision de la Figure V.9 en décodant le premier morceau 1 de la première collision, et en le soustrayant de la deuxième collision peut obtenir le morceau 2 qui est soustrait de la première collision pour décoder le morceau 3, etc. En utilisant le même principe, ZigZag peut décoder d'autres modèles de collision comme ceux de la Figure V.10. En particulier, il peut décoder les modèles où les collisions se chevauchent comme sur la Figure V.10a, et ceux où les paquets en collision changent d'ordre comme sur la Figure V.10b, ou même encore dans les situations où les paquets ont des tailles différentes, comme sur la Figure V.10c. Notons aussi que Zigzag peut encore décoder des collisions entre trois paquets ou plus (Figure V.11).

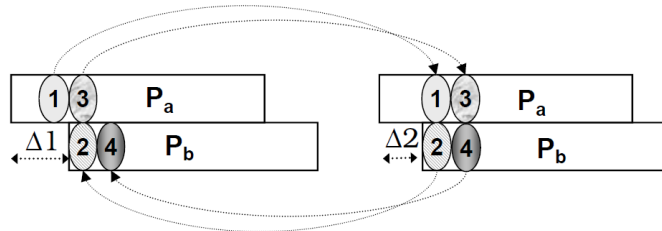


Figure V.9: Décodage ZigZag.

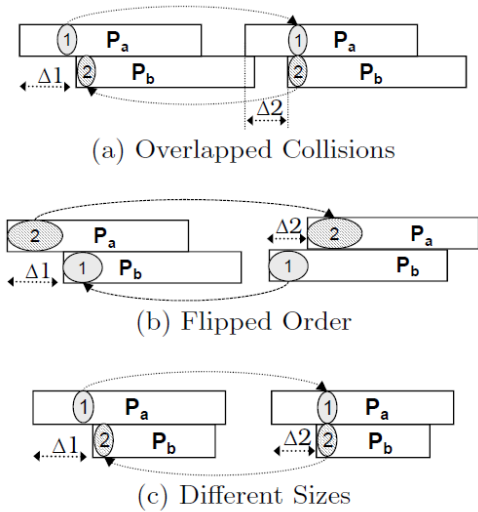


Figure V.10: Application de ZigZag dans différents modèles de collision.

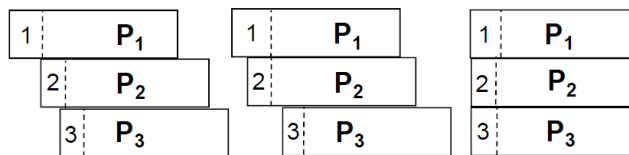


Figure V.11: Application de ZigZag pour trois collisions.

V.4 Etudes antérieures

Le concept d'ANC a donné lieu à plusieurs travaux pour étudier son comportement dans différentes conditions ou pour l'appliquer avec de nombreuses améliorations pour être plus robuste et flexible dans différentes applications. Dans [KK⁺11], un algorithme basé sur l'ANC est développé montrant les performances des services de la couche MAC en termes de temps de transfert des paquets. Il s'agit d'un protocole MAC théorique pour l'ANC utilisant une couche MAC abstraite pour observer et combiner des bornes de complexité entre une couche MAC basse sur l'ANC et un protocole de haut niveau, pour la diffusion des paquets. Dans [MGM10], les auteurs étudient l'ANC sous un régime à haut rapport signal sur bruit et déterminent le débit réalisable avec ce mécanisme. Tous les travaux sur l'ANC considèrent un scénario où le récepteur est l'un des deux émetteurs, comme le canal de relais à deux voies (TWRC), de sorte qu'il peut seulement séparer un des deux paquets en collision s'il connaît l'autre. Par contre, aucune proposition de codage analogique faite jusqu'à présent ne permet de séparer deux paquets entrant en collision pour laquelle le récepteur n'a ni l'un ni l'autre. L'objet du mécanisme que nous proposons dans les pages qui suivent est justement de le permettre.

Un autre point commun de ces travaux [KKG07, SHJD10] est leur utilisation de la modulation différentielle pour éviter le problème des déphasages. Dans [VTF11], un codage réseaux analogique utilisant une modulation non cohérente FSK est proposé pour améliorer le débit. Cependant, les modulations non cohérentes, qui ne nécessitent pas la valeur exacte de la phase dans le processus de démodulation, ne sont pas appropriées pour des débits élevés (cf. [B92]). Notons que ces modulations sont utilisées dans l'algorithme de l'ANC pour empêcher la complexité des algorithmes d'identification de phase. Ce type de modulations n'est pas utilisé dans certaines technologies, comme le 802.11p IEEE, consacrée aux réseaux véhiculaires et utilisant des modulations cohérentes comme la modulation PSK.

Notre approche fonctionne pour ces types de modulations qui reposent sur le décalage de phase et sont plus adaptées à des débits de données élevés. Dans notre cas, nous nous intéressons à la modulation QPSK acceptée par la couche PHY du 802.11p. En outre, comme indiqué par plusieurs expériences dans [BSK10], le QPSK est la meilleure modulation qui a de bonnes performances sur le canal des communications V2V.

Contrairement à l'ANC, et comme la technique de ZigZag, le récepteur utilisant notre approche permet de séparer deux paquets entrés en collision sans avoir aucun des deux paquets séparément. Par conséquent, ceci a un coût sur dans la technique ZigZag et de même dans la notre. Dans le meilleur cas du décodage ZigZag, le récepteur a besoin d'au moins deux retransmissions (deux versions) pour les mêmes paquets entrés en collision dans des formes différentes. Dans notre méthode, l'émetteur envoie un paquet dont la taille est doublée sans retransmission. La surcharge ajoutée au paquet d'origine est essentielle pour séparer les deux paquets interférés. Le seul coût payé est la charge supplémentaire sur le paquet quand il n'y a pas de collision. En effet, quand deux paquets entrent en collision, nous transmettons deux fois, ce qu'il faudrait aussi faire sans notre méthode mais nous transmettons aussi deux fois lorsqu'il n'y a pas de collision, ce qui n'est pas nécessaire sans notre méthode. Cependant, ce coût est raisonnable pour l'annulation d'interférence en particulier dans le cas des réseaux véhiculaires où la probabilité de collision est très élevée et la retransmission de paquets n'est pas disponible (balises, messages diffusés) et où les transmissions doivent être aussi rapides que possible vue la volatilité des topologies. De manière générale, l'augmentation de la taille des paquets augmente la congestion. Nous allons montrer dans le reste de cet article que, avec notre méthode, même si la taille du paquet est augmentée, la capacité du canal est toujours améliorée et le taux de réception du paquet est augmenté. C'est la conséquence de la possibilité d'envoyer deux messages en même temps et de bien les décoder, même si les deux sont inconnus.

V.5 Le mécanisme proposé : BANC

V.5.1 BANC : Le scénario

La Figure V.12 présente un scénario simple pour notre approche. Plusieurs véhicules sur la route vont diffuser leurs paquets. Si les véhicules A, B, C transmettent leurs paquets 'a', 'b', et 'c' au même instant, le véhicule R1 reçoit les paquets 'a' et 'b' dans une collision. Selon notre approche, R1 peut séparer les deux signaux (de a et b) et les envoyer séparément. Il en est de même pour véhicule R2 qui reçoit les deux paquets 'b' et 'c' entrés en collision. Notre mécanisme peut séparer seulement deux signaux qui sont entrés en collision. Son efficacité dépend donc de la fréquence d'apparition de collisions formées de deux paquets par rapport à la fréquence de celles formées de trois ou plusieurs paquets. Comme montré dans notre étude de performance (cf. §V.6), c'est le cas dans des conditions typiques du trafic routier et c'est ce qui rend notre mécanisme proposé efficace.

Après la séparation des deux signaux interférés, chacun des véhicules R1 et R2 peut, au lieu de rediffuser les paquets séparément, appliquer un codage réseau par la combinaison linéaire des deux paquets décodés, et retransmettre le résultat. Si leurs transmissions se font au même instant, le véhicule R3 reçoit les deux signaux entrés en collision ((a + b) et (b + c)), et peut les séparer correctement avec notre mécanisme. Par conséquent, après avoir déjà reçu le paquet 'c', R3 résout les deux équations linéaires et décode 'a' et 'b' séparément.

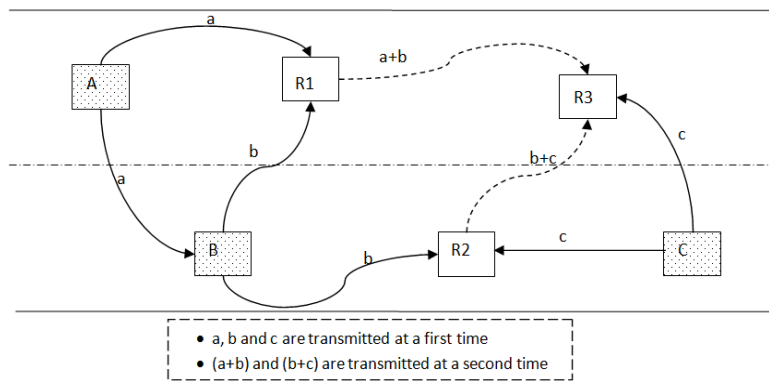


Figure V.12: Scénario d'application du BANC

V.5.2 BANC : Le modèle

Notre but est de permettre à deux nœuds A et B de transmettre deux signaux de N et N' symboles respectivement:

$$S_A = y_A[n], n = 1, 2, \dots, N \text{ et } S_B = y_B[n], n = 1, 2, \dots, N'.$$

Chaque symbole possède deux composantes, l'amplitude et la phase :

$$y_A[n] : (A_m[n], \theta_m[n]), y_B[n] : (B_m[n], \Phi_m[n]).$$

Si deux signaux interfèrent au niveau du récepteur, le signal résultant est :

$$y[n] = y_A[n] + y_B[n].$$

La forme générale du signal de collision est: $y[n] = h' A_s[n] e^{i(\theta_s[n] + \gamma')} + h'' B_s[n] e^{i(\Phi_s[n] + \gamma'')} + N[n]$, h', h'' étant les atténuations du canal, $A_s[n], B_s[n]$ les amplitudes transmis par les émetteurs, $\theta_s[n], \Phi_s[n]$ les phases, γ', γ'' les décalages de phase, et $N[n]$ le bruit de moyenne nulle et de variance σ^2 .

L'indice s est utilisé pour indiquer les composantes du signal qui sont transmises par l'émetteur, et l'indice m est utilisé pour indiquer les composantes du signal du paquet initial sans changement ou addition. L'effet des canaux sans fil, représenté par l'atténuation du canal et le déphasage, affecte tout le signal mais varie peu pendant la transmission des paquets qui sont petits et donc il ne change pas entre les symboles d'un même signal (pour des vitesses de véhicules et une taille moyenne de paquets, le temps de cohérence est tel que le canal peut être considéré comme quasi-statique).

Si les symboles sont envoyés sans aucune modification : $A_s = A_m, B_s = B_m, \theta_s = \theta_m, \Phi_s = \Phi_m$.

Dans la modulation PSK, l'amplitude est constante pour tous les symboles, donc: $A_s[n] = A$ et $B_s[n] = B$. La forme générale d'un symbole du signal interféré s'écrit: $y[n] = A e^{i\theta[n]} + B e^{i\Phi[n]} + N[n]$ où $A = h' A_s, B = h'' B_s, \theta[n] = \theta_s[n] + \gamma',$ et $\Phi[n] = \Phi_s[n] + \gamma''$.

V.5.3 Estimation de l'amplitude

Selon [KKGK07, H00], lorsqu'on reçoit $y[n] = A e^{i\theta[n]} + B e^{i\Phi[n]} + N[n]$, les valeurs de A et B sont approchées par V :

$$V = \frac{1}{2} \left(\sqrt{X + \frac{\pi}{2}(Y - X) - \sigma^2} \pm \sqrt{X + \frac{\pi}{2}(Z - X) - \sigma^2} \right),$$

$$\text{avec, } X = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y[n]|^2, Y = \frac{2}{N} \sum_{n: |y[n]|^2 > X} |y[n]|^2, Z = \frac{2}{N} \sum_{n: |y[n]|^2 \leq X} |y[n]|^2.$$

V.5.4 Estimation de la phase

V.5.4.1 Au niveau émetteur

Pour estimer le bruit ajouté sur la phase, l'émetteur ajoute au début et à la fin du paquet une séquence pilote de k symboles fixes ($y[0], y[1], \dots, y[k-1]$) (cf. Figure V.13), dont les phases sont connues de tous les nœuds :

$$y[0]:(A_m, \delta_0), y[1]:(A_m, \delta_1), y[x]:(A_m, \delta_x).$$

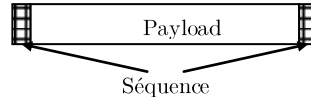


Figure V.13: Forme du paquet envoyé

Dans le corps du paquet, l'émetteur envoie après chaque couple de deux symboles de données successifs, deux autres symboles. Ces deux derniers portent deux phases qui sont les résultats de deux fonctions non-linéaires différentes (\odot et \otimes) appliquées sur les deux symboles précédents. Ces phases résultantes sont utilisées par le récepteur pour éliminer les ambiguïtés et décoder les valeurs des phases reçues.

L'explication des deux fonctions \odot et \otimes est donnée au §V.5.4.4.

$$\left. \begin{cases} \theta_s[n] = \theta_m[n] \\ \theta_s[n+1] = \theta_m[n+1] \\ \theta_s[n+2] = (\theta_m[n] \odot \theta_m[n+1]) \\ \theta_s[n+3] = (\theta_m[n] \otimes \theta_m[n+1]) \end{cases} \right\} \quad (1)$$

V.5.4.2 Au niveau récepteur

Selon [KKG07, H00], les phases des symboles interférés, ou aussi la $n^{\text{ième}}$ paire de symboles, sont estimées par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta[n] = \arg \left[y[n] \left(A + BD[n] + jsB\sqrt{1-D[n]^2} \right) \right] \\ \Phi[n] = \arg \left[y[n] \left(B + AD[n] - jsA\sqrt{1-D[n]^2} \right) \right] \end{array} \right\}, s = \pm 1, \quad (2)$$

avec, $D[n] = \frac{|y[n]|^2 - A^2 - B^2}{2AB}$ et $|y[n]|$ le module. De même pour la $n+1^{\text{ième}}$ paire de symboles:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta[n+1] = \arg \left[y[n+1] \left(A + BD[n+1] + jsB\sqrt{1-D^i[n+1]} \right) \right] \\ \Phi[n+1] = \arg \left[y[n+1] \left(B + AD[n+1] - jsA\sqrt{1-D^i[n+1]} \right) \right] \end{array} \right\}, s = \pm 1. \quad (3)$$

Il nous faut estimer γ' , le décalage de phase qui dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Dans la séquence des symboles reçue, on a :

$$\theta[x] = \arg \left[y[x] \left(A + BD[x] \pm jB\sqrt{1-D[x]^2} \right) \right], x = 0, 1, 2, \dots, k-1$$

Avant de continuer, nous considérons trois cas différents selon la position entre les deux paquets entrant en collision (cf. Figure V.14). Dans le premier cas (a), les deux paquets sont entièrement synchronisés, et leurs séquences pilotes ne coïncident pas avec les charges utiles des paquets. Le cas (b) représente un décalage entre les deux paquets d'une manière telle qu'il reste une intersection entre les séquences pilotes. Dans le cas (c), le décalage est beaucoup plus grand, chacun des deux paquets entrant en collision possède alors une séquence pilote sans collision, une au début du paquet et l'autre à son extrémité. Après que le récepteur a localisé la position relative entre les deux paquets interférés, il peut alors connaître, pour chaque symbole du premier paquet, son symbole correspondant dans le deuxième paquet.

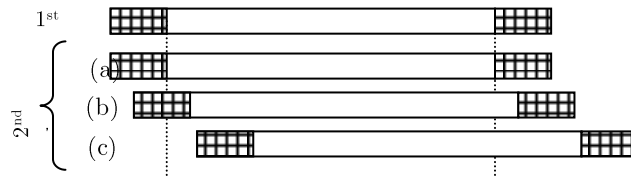


Figure V.14: Différentes positions des paquets interférés

Dans un premier temps, les paires de symboles interférés dans les séquences pilotes sont prises. Pour chaque couple de symboles successifs de la séquence pilote interférée, on a :

$$\begin{aligned} \theta[x] &= \arg \left[y[x] \left(A + BD[x] \pm jB\sqrt{1-D[x]^2} \right) \right] \\ \theta[x+1] &= \arg \left[y[x+1] \left(A + BD[x+1] \pm jB\sqrt{1-D[x+1]^2} \right) \right] \end{aligned}$$

Rappelons que $y[x]$, le symbole reçu, est obtenu par la collision de deux symboles de deux paquets différents. Les valeurs des symboles successifs sont fixes, alors : $\theta[x] = \delta_x + \gamma'$, $\theta[x+1] = \delta_{x+1} + \gamma'$. On choisit les valeurs de $\theta[x]$ et $\theta[x+1]$ qui vérifient le plus cette équation : $\theta[x] - \theta[x+1] = \delta_x - \delta_{x+1}$. Donc, le décalage de phase peut être estimé par :

$$\gamma' = \frac{(\theta[x] - \delta_x) + (\theta[x+1] - \delta_{x+1})}{2}$$

Cette estimation est répétée pour chaque couple de symboles successifs des séquences pilotes interférées. Enfin, l'estimation finale du décalage de phase est calculée en faisant la moyenne de tous les décalages estimés :

$$\gamma' = \frac{\sum_{x=0}^{k-2} (\theta[x] - \delta_x) + (\theta[x+1] - \delta_x)}{k-1}.$$

On peut obtenir un résultat pareil pour le second paquet. Le décalage de phase est estimé par :

$$\gamma'' = \frac{\sum_{x=0}^{k-2} (\Phi[x] - \delta_x) + (\Phi[x+1] - \delta_x)}{k-1}.$$

Dans un deuxième temps, tous les symboles restant des séquences pilotes qui sont libres de collision sont pris pour avoir une deuxième estimation du décalage de phase. Dans ce cas, l'estimation est simple parce que le récepteur connaît les phases envoyées, et donc le décalage de phase estimé est la différence entre la phase reçue et la phase envoyée. Après cela, une nouvelle estimation du déphasage est obtenue en faisant la moyenne de la première phase (estimée en utilisant les symboles pilotes interférés) et la deuxième phase (estimée en utilisant les symboles pilotes non-interférés).

À la fin, ayant $\theta[n+1] = \theta_m[n+1] + \gamma'$ et connaissant γ' , nous pouvons calculer les phases sans erreur:

$$\theta_m[n] = \theta[n] - \gamma', \quad \theta_m[n+1] = \theta[n+1] - \gamma'.$$

Notons ici que nous avons deux solutions possibles pour $(\theta[n], \theta[n+1])$. De même, pour le deuxième paquet, connaissant γ'' nous pouvons calculer les phases sans erreur:

$$\Phi_m[n] = \Phi_n - \gamma'', \quad \Phi_m[n+1] = \Phi[n+1] - \gamma''.$$

Nous avons aussi deux solutions possibles pour $(\Phi[n], \Phi[n+1])$.

V.5.4.3 Résolution des équations

o Solutions possibles

En exploitant les deux équations ci-dessus, nous arrivons aux propositions suivantes:

- **Proposition 1:** Si $(\theta_s[n], \Phi_s[n]) = (k.\pi/4, k'.\pi/4)$ et $|\theta_s[n] - \Phi_s[n]| = \pi/2$, les solutions possibles de l'équation 2 sont $(\theta[n], \Phi[n]) = \{(k.\pi/4, k'.\pi/4), (k.\pi/4, k'.\pi/4)\}$, avec $k = 1, 3, 5, 7$; $k' = 1, 3, 5, 7$.
- **Proposition 2:** Si $(\theta_s[n], \Phi_s[n]) = (k.\pi/4, k.\pi/4)$ ou $|\theta_s[n] - \Phi_s[n]| = \pi$, ayant $A \approx B$ et $A \neq B$, alors il y a une seule solution possible pour cette paire dans l'équation 2.

Preuves: Avant de commencer, notons que les puissances de transmission des nœuds sont presque les mêmes, donc la différence entre les amplitudes A et B des deux signaux A and B est très petite, mais nous supposons toujours que A est différente de B. Nous commençons notre preuve avec $\theta = \arg \left[y \left(A + BD \pm jB\sqrt{1-D^2} \right) \right]$ et $D = \cos(\theta_s - \Phi_s)$. Toutes les phases sont calculées avec $\text{mod}2\pi$.

❖ *Preuve de la Proposition 1*

• Si $\Phi_s = \theta_s \pm \pi/2$ alors $y = \left(Ae^{j\theta_s} + Be^{j(\theta_s + q\pi/2)} \right)$ $q = \pm 1$,
et $D = 0$. Donc, $\theta = \arg \left[\left(Ae^{j\theta_s} + Be^{j(\theta_s + q\pi/2)} \right) (A \pm jB) \right]$.

Supposons que $A \approx B$, on a alors

$$\begin{aligned} \theta &= \arg \left[A^2 e^{j\theta_s} \left(1 + e^{j(q\pi/2)} \right) \right] + \arg [A \pm jA] \\ &= \arg \left[A^2 e^{j\theta_s} \right] + \arg \left[1 + e^{j(q\pi/2)} \right] + \arg [A \pm jA] \end{aligned}$$

$$\text{Donc } \theta = \theta_s + q \cdot \pi/4 \pm \pi/4.$$

Le même raisonnement peut être fait pour obtenir

$$\Phi = \Phi_s + q \cdot \pi/4 \pm \pi/4.$$

Ayant $\theta_s = k \frac{\pi}{4}$ et $\Phi_s = k' \frac{\pi}{4}$, k et $k' = 1, 3, 5, 7$; $s = \pm 1$

• Si $k > k'$, alors $q = -1$.

$$\text{Donc, } \theta = (k-1) \frac{\pi}{4} + s \frac{\pi}{4} \text{ et } \Phi = (k'+1) \frac{\pi}{4} - s \frac{\pi}{4}.$$

• Si $k < k'$, alors $q = +1$.

$$\text{Donc, } \theta = (k+1) \frac{\pi}{4} + s \frac{\pi}{4} \text{ et } \Phi = (k'-1) \frac{\pi}{4} + s \frac{\pi}{4}.$$

❖ *Preuve de la Proposition 2*

• Si $\theta_s = \Phi_s$ alors $y = (A+B)e^{j\theta_s}$ et $D = 1$.

$$\text{Donc, } \theta = \arg [y(A+B)] = \arg [y] = \theta_s.$$

• Si $\theta_s - \Phi_s = \pm\pi$ alors $y = Ae^{j\theta_s} + Be^{j(\theta_s \pm \pi)}$ et $D = 1$

$$\begin{aligned} \text{Donc, } \theta &= \arg [y(A+B)] = \arg [Ae^{j\theta_s} + Be^{j\theta_s} \cdot e^{\pm j\pi}] \\ &= \arg [Ae^{j\theta_s} \pm Be^{j\theta_s}]. \end{aligned}$$

Ayant $A = B + \varepsilon$, où $\varepsilon \ll A$, on obtient :

$$\theta = \arg[\mathbf{B}e^{j\theta_s} \pm \varepsilon e^{j\theta_s}] \approx \theta_s.$$

Le même raisonnement peut être fait pour obtenir $\Phi \approx \Phi_s$.

Finalement, ayant quatre paires de phases en collision $\{(\theta[n+k], \Phi[n+k])\}, k=0,1,2,3$, notre but est d'estimer les valeurs des deux premières paires de phases (pour $k=0$ et $k=1$). Le récepteur calcule toutes les solutions possibles des quatre paires en utilisant l'équation 2 et sélectionne parmi elles les phases qui valident ces équations :

$$\begin{aligned} \theta[n+2] &= (\theta[n] \odot \theta[n+1]), \quad \Phi[n+2] = (\Phi[n] \odot \Phi[n+1]), \\ \theta[n+3] &= (\theta[n] \otimes \theta[n+1]) \text{ et } \Phi[n+3] = (\Phi[n] \otimes \Phi[n+1]). \end{aligned}$$

Table V.I. Fonction de mise en correspondance entre phases successives

\odot	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$
$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$

V.5.4.4 Construction des fonctions de codage/décodage

Les fonctions non linéaires sont formées d'une manière optimisée pour éliminer les ambiguïtés entre les solutions possibles des phases. Comme mentionné précédemment, le récepteur traite chaque quadruple de paires des symboles reçus en collision:

$$\{(\theta[n+k], \Phi[n+k])\}, k=0,1,2,3.$$

Caractéristiques de la première fonction de mise en correspondance (son résultat est porté par le troisième symbole du quadruple) : Deux situations sont traitées. Si le récepteur connaît la troisième paire de phases, il peut alors calculer les deux premières paires seulement si chacune des deux cases successives, verticalement ou horizontalement dans la table de mise en correspondance (cf. tableau I), ne sont pas égales. Si le récepteur connaît seulement la seconde paire de phases, et si la différence entre chacune des deux phases successives horizontales dans la table de mise en correspondance est égale à π , il est possible de calculer la première paire sans ambiguïté. En réalité, cette caractéristique oblige les valeurs de la troisième paire, quand la seconde paire vérifie la **proposition 2**, à vérifier

également cette proposition. Ainsi, lorsque le récepteur connaît la deuxième paire de phases, il connaît aussi la troisième paire, et donc il peut connaître la première paire.

Caractéristiques de la deuxième fonction de mise en correspondance (son résultat est porté par le quatrième symbole du quadruple) : Cette table de mise en correspondance est la transposée de la première table. Ici, nous avons aussi deux situations. Si le récepteur connaît la quatrième paire de phases, alors il peut calculer les deux premières paires seulement si chaque couple de cases successives, verticalement ou horizontalement dans la table de mise en correspondance, ne sont pas égales. Si le récepteur connaît la première paire de phases, et si la différence entre chacune des deux phases successives horizontales dans la table de mise en correspondance est égale à π , il est possible de calculer la première paire sans ambiguïté. En réalité, cette caractéristique pousse les valeurs de la quatrième paire, lorsque la première paire vérifie la **proposition 2**, à vérifier également cette proposition. Ainsi, lorsque le récepteur connaît la première paire de phases, il en est de même pour la quatrième paire et donc, il peut connaître la première paire de phases. En utilisant cette fonction, le récepteur peut éliminer les ambiguïtés qui n'ont pas été supprimées par la première fonction de mise en correspondance.

Caractéristique des deux fonctions de mise en correspondance: La dernière situation où nous pouvons avoir des ambiguïtés est le cas où le récepteur ne connaît aucune des quatre paires de phases. Toutefois, cette situation ne peut pas se produire en raison de la caractéristique des deux fonctions de mise en correspondance, ce qui implique, si aucune des deux premières paires successives ($k = 0$ ou 1) n'est connue, que l'une de la troisième ou la quatrième paire est connue.

V.5.4.5 Décodage de la séquence d'origine de bits

Après l'application de cette procédure sur chaque quadruple de symboles, les séquences de phases des deux émetteurs peuvent alors être estimées. Dans la modulation QPSK, il y a quatre différentes phases $\{i\pi/4\}$, $i = 1, 3, 5, 7$. Chaque phase est mise en correspondance avec deux bits. Pour faire face à des erreurs d'estimations et de distorsion du signal, les phases estimées sont arrondies aux plus proches valeurs des phases utilisées dans la modulation QPSK. Le récepteur peut décoder les phases en bits.

V.6 Evaluation des performances

Notre objectif est d'étudier les avantages de notre mécanisme sur les performances du CCH lors de la diffusion des balises périodiques. Dans cette étude, nous avons utilisé la

probabilité de réception de message comme mesure de performance. C'est le rapport du nombre de messages reçus et décodés avec succès sur le nombre de messages envoyés. Nous avons comparé notre mécanisme avec deux autres approches. Le premier, appelé «Standard», se réfère à la situation de l'IEEE 802.11p où les balises sont diffusées sans retransmissions. Une modification à cette situation est introduite où les tentatives de transmission des paquets sont réparties uniformément sur l'intervalle CCH utile (46ms). Cette répartition sert à minimiser l'effet du grand nombre de nœuds voulant transmettre leurs paquets au début de chaque période CCH.

L'autre approche comparée est une adaptation du mécanisme ZigZag au mode de diffusion. Comme mentionné précédemment, pour ZigZag, l'émetteur doit retransmettre son paquet suite au retour du récepteur. C'est ce qui pose problème pour l'application de ZigZag pour les messages de diffusion. Pour permettre à ZigZag de fonctionner en mode diffusion, chaque nœud doit diffuser son paquet (signal) pour deux fois successives et sans retour du côté du récepteur. Un nœud récepteur permet de séparer deux paquets (signaux) qui sont entrés en collision seulement s'il obtient deux versions différentes de cette collision. Nous appelons ce mécanisme "Double Transmission" ou "DT".

Plusieurs simulations à événements discrets sont faites sur MATLAB. Les paramètres de simulation sont résumés dans la Table V.II.

Table V.II. Paramètres de simulation

Paramètre	Valeurs
Période CCH	46 ms
Durée du slot	16 μ s
Taux de génération des paquets	10 Hz
Taille de paquet	200-400 octets
Débit de transmission	6 Mbps
Couverture de transmission	1000 m

Sur la Figure V.15, le taux de signaux entrés en collision au niveau du récepteur est représenté pour différents nombres de nœuds et pour une moyenne de 50 densités prises entre 5 et 250 nœuds. Cette étude montre combien notre approche peut améliorer la capacité du canal en augmentant la probabilité de réception puisque BANC peut séparer seulement deux signaux entrés en collision. Nous remarquons que la collision entre deux signaux possède le taux d'occurrence le plus élevé par rapport aux autres et pour plusieurs densités de

nœuds. Il est évident que si le nombre de nœuds augmente significativement, la probabilité de collision devient très élevée et les collisions sont souvent produites par plus que deux signaux. Malgré cette situation, notre mécanisme peut améliorer le taux de réception des paquets en séparant les collisions de deux signaux.

Pour étudier le taux d'efficacité de notre mécanisme, nous le comparons à un mécanisme basé sur ZigZag et adapté au mode de diffusion. La Figure V.16 montre que notre approche peut améliorer la probabilité d'une bonne réception des paquets malgré l'augmentation de la taille des paquets transmis. Comme vu sur la Figure V.17, malgré la diminution du taux de réception de paquet à cause du temps d'expiration fixé par la durée de l'intervalle CCH, le gain apporté par BANC est beaucoup plus grand et permet donc d'accroître la capacité du canal. Notons que ce gain diminue au-delà d'un certain nombre de véhicules (140 véh.) où la plupart des collisions sont composées de plus de deux signaux. Le problème avec l'approche de "double transmission" se produit généralement quand le temps d'inter-arrivée des transmissions de paquets entre les nœuds est de petite taille, le nombre de collisions entre plus de deux nœuds augmentant alors. Ce phénomène diminue le temps de convergence pour la séparation du signal et donc le taux de réception de paquets avec succès. Un autre problème avec le mécanisme DT est que le récepteur, au lieu de recevoir deux versions différentes des mêmes paquets entrés en collision afin de les séparer, reçoit plusieurs collisions de différents paquets envoyés par différents véhicules, et donc aucun de ces paquets ne peut être décodé.

Enfin, nous étudions les performances de BANC en termes de la capacité du canal lorsqu'on fait varier la taille du paquet (balise). On peut voir sur la Figure V.18 que BANC améliore toujours la capacité du canal par rapport à l'approche DT qui peut avoir une influence négative sur les performances lorsque le nombre de nœuds augmente. Le fait que le canal a un taux de collision de paquets élevé, lorsque la taille des paquets et le nombre des nœuds sont grands, explique l'amélioration de la capacité du canal par BANC.

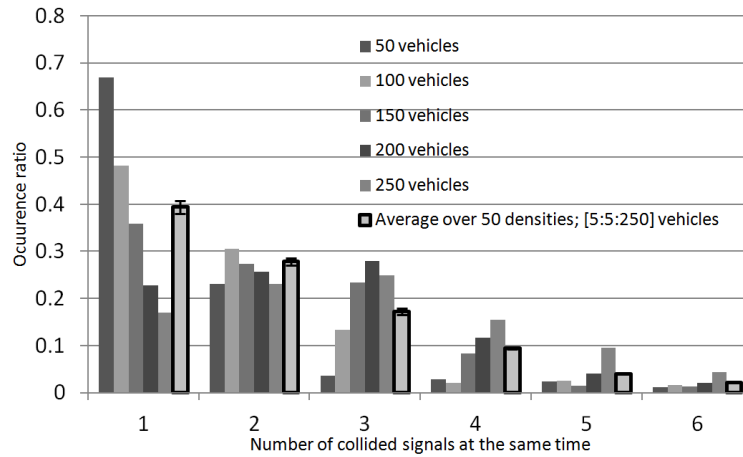


Figure V.15 : Taux d'occurrence vs. Nombre des signaux interférés au même moment. L'intervalle de confiance est donné pour une moyenne de 50 densités de véhicules.

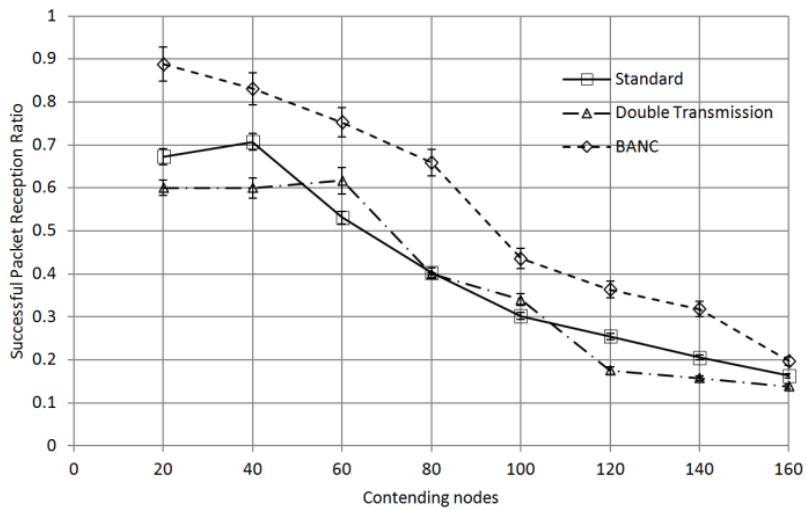


Figure V.16: Probabilité de réception vs. Nombre de nœuds

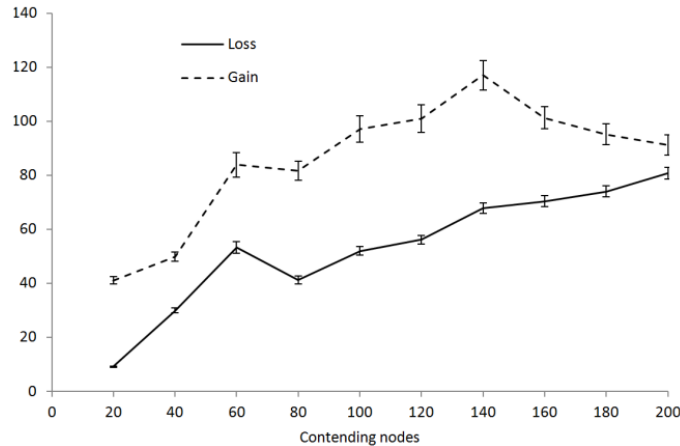


Figure V.17: Taux des paquets perdus et gagnés par BANC par rapport au standard

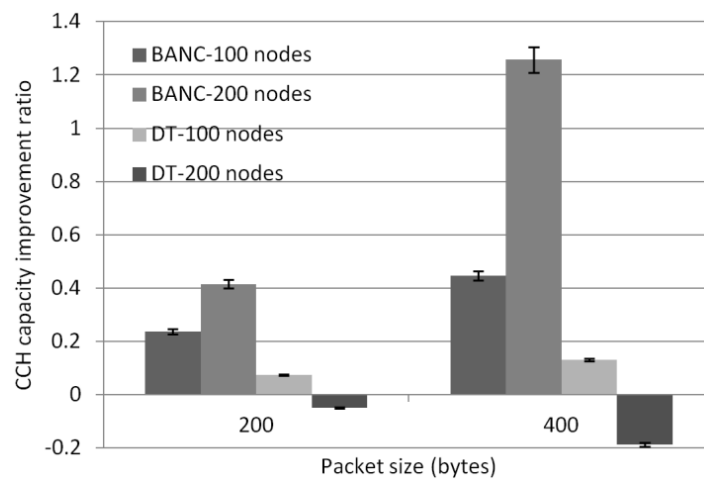


Figure V.18: Taux d'amélioration de la capacité du CCH

V.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons BANC, une nouvelle approche basée sur la technique du codage analogique (ANC) pour séparer les collisions entre les messages diffusés sur le CCH. Tandis que les autres algorithmes comme ZigZag ne sont pas adaptés au mode de diffusion, notre mécanisme peut faire face à cette situation en envoyant plus d'informations définies par deux symboles pour chaque paire de symboles successifs d'un paquet. En effet, ZigZag nécessite des accusés de réception ou de non réception pour provoquer les retransmissions de l'émetteur en cas de collision or le trafic diffusé ne permet pas l'utilisation de ces acquittements. Ces deux symboles ajoutés sont des applications des deux fonctions non-linéaires de mise en correspondance des deux symboles originaux successifs. Le coût

supplémentaire n'est pas très élevé en termes de bande passante puisque les messages diffusés sur le CCH sont de petites tailles. En outre, notre technique est adaptée à la modulation QPSK, modulation la plus utilisée dans la norme IEEE 802.11p pour les réseaux véhiculaires. Les résultats des simulations montrent que BANC augmente le taux de réception des paquets et améliore la capacité du canal. Notre proposition peut finalement être vue comme un mécanisme proactif bien adapté à la situation des réseaux véhiculaires où il est préférable de réagir très vite. En effet, les topologies sont très volatiles et retransmettre à la demande plusieurs fois est un processus long.

De nombreux développements sont possibles à notre proposition. L'impact de différentes conditions de canal sur les performances de notre mécanisme pourrait être investigué. La validation en environnement réel serait aussi très importante.

Conceptuellement, notre proposition apporte une idée radicalement nouvelle par rapport à l'utilisation qui était faite jusqu'ici du codage analogique. En effet, dans toutes les propositions de codage analogique, un des deux paquets entrant en collision est supposé connu. Ce n'est pas toujours le cas et des scénarios comme les réseaux véhiculaires peuvent justement tirer parti d'un mécanisme capable de séparer deux paquets inconnus.

Chapitre VI. Conclusions et perspectives

Dans les deux premiers chapitres de cette thèse, nous présentons quelques problématiques et l'état de l'art des réseaux véhiculaires. Les besoins pour des applications de sécurité routière ont poussé les organismes internationaux et les industries à développer des technologies spécifiques aux réseaux véhiculaires pour contribuer dans ce domaine (DSRC/WAVE, CALM,...). Plusieurs applications de sécurité ou d'autres services de données (accès internet,...) sont ainsi développés. Les réseaux véhiculaires possèdent des caractéristiques spécifiques comme le changement rapide de la topologie, l'absence d'exigence en termes de puissance, la présence d'équipement de positionnement géographique (par exemple, le GPS), la grande couverture de transmission des véhicules arrivant à 1000 m, etc. Cela nous amène à présenter les grandes problématiques au niveau de l'accès au canal et d'allocation de ressources, et qui sont traitées dans le reste de cette thèse. Notre recherche se concentre principalement dans la couche MAC, et aussi dans la couche physique qui sont décrites dans ce chapitre. En vue de l'étude de performances des réseaux véhiculaires, nous avons présenté dans ce chapitre les modèles de trafic routier et les différents types de simulateurs.

La première problématique repose sur l'allocation de ressources et l'accès aux canaux CCH et SCH. Les réseaux véhiculaires offrent la possibilité d'un accès dynamique à plusieurs canaux, ce qui permet d'augmenter la capacité du réseau mais pose plusieurs difficultés. Il faut d'abord concevoir un mécanisme efficace, décentralisé et dynamique du choix des canaux. L'art n'est pas vide de propositions, soit venant des réseaux mobiles ad-hoc soit conçues spécifiquement pour les réseaux véhiculaires mais aucun auteur n'a vraiment songé à une approche opportuniste qui permette de gagner du temps dans ce contexte si volatile. C'était l'objet du premier mécanisme donné dans le premier chapitre de cette thèse.

Dans ce mécanisme proposé, appelé mécanisme d'accès à canaux multiples opportuniste, chaque véhicule possède une liste d'états dans laquelle il affiche l'état de chaque canal SCH s'il est occupé ou non, et le temps pour lequel ce canal est occupé. Cette liste doit être mise à jour

périodiquement par le véhicule à partir des balises d'allocation (WSA) échangés par ses voisins et écoutées pendant l'intervalle CCH.

Pour être plus précis, avec cette méthode un véhicule doit écouter tous les WSAs envoyés par les véhicules présents dans une certaine zone géographique que nous appelons « zone sensible ». Le problème de cette méthode est qu'elle est très dépendante d'une bonne mise à jour des listes d'états, ce qui n'est pas toujours assuré car des véhicules peuvent manquer certaines WSAs envoyées dans leurs zones sensibles. De manière générale, l'absence de signal, ou sa faiblesse, est due à de nombreuses causes possibles: effets de réflexion et de diffraction dus aux maisons, aux structures de hauteur élevée et aux voitures garées, distance de transmission importante provoquant un affaiblissement du signal ou bien augmentant les effets des réflexions et diffractions. Normalement, cette zone sensible est égale à la portée de transmission d'un véhicule qui atteint les 1000 m dans les VANETs. La « zone sensible » large et la grande densité de trafic rendent le problème de la surdité des récepteurs devant les messages qu'ils devraient recevoir plus fréquents et chroniques. Les messages peuvent aussi n'être pas reçus à cause de la volatilité de la topologie.

Pour diminuer l'effet de ce problème, on a divisé le chemin routier en zones périodiques. Pour faire face aux collisions dues aux nœuds cachés, la longueur de chaque zone est fixée à deux fois la couverture de transmission d'un émetteur. Chaque zone est divisée en secteurs géographiques d'une même taille. Les véhicules possèdent une table d'allocation et une liste des états des canaux. La première contient une correspondance entre un secteur géographique et un des canaux SCHs valables dans le spectre. Chaque véhicule connaît sa position géographique à travers les informations du GPS et par suite il peut déterminer son secteur géographique. D'après la table d'allocation préfixée, le véhicule sélectionne un canal à un instant donné. Ce canal est référé comme un canal par défaut, sur lequel le véhicule peut transmettre ses données, à condition que ce canal ne soit pas indiqué comme occupé dans la liste des états des canaux.

Avoir plusieurs canaux sur lesquels plusieurs utilisateurs émettent en même temps requiert d'avoir des points de synchronisation où tout le monde revient sur le même canal de contrôle pour recevoir le trafic destiné à tous, comme les données urgentes, notamment de sécurité routière, ou la signalisation mais ceci entraîne une mauvaise utilisation des autres canaux lorsque le trafic destiné à tous est peu important par rapport à la durée allouée au retour sur le canal de contrôle. Nous élaborons alors deux mécanismes qui permettent d'offrir un compromis entre réception des messages importants, tant de données que de signalisation, et augmentation du taux d'utilisation des autres canaux de données.

Ces deux mécanismes traitent du problème de la commutation entre le CCH et le SCH afin d'optimiser le taux d'utilisation de l'ensemble des canaux réservés à ce système. Dans le premier, appelé LISA, les véhicules peuvent adapter les temps de synchronisation sur les canaux de contrôle en se basant sur l'annonce éventuelle qu'un trafic doit être émis sur le canal de contrôle, ce qui rend la durée passée dessus fonction de la charge des différents trafics de signalisation ou de données urgentes ou de sécurité routière. Ceci est géré par un intervalle de temps d'écoute à un instant approprié de l'intervalle CCH. Chaque véhicule, possédant un paquet urgent, diffuse un signal d'annonce durant cet intervalle de temps d'écoute. Un véhicule, voulant échanger des données sur un canal SCH pendant l'intervalle CCH, peut changer de canal s'il n'entend aucun signal durant l'intervalle de temps d'écoute. Dans le deuxième mécanisme, appelé chaîne de transmission périodique, une chaîne de véhicules est créée pour diffuser les données et réutiliser le temps passé sur le canal CCH pour transmettre des données SCH. Alors que certains véhicules écoutent le CCH, d'autres transmettent leurs données sur le SCH. Les données urgentes sont récupérées et diffusées sur un canal SCH par le premier véhicule de la chaîne qui reste à l'écoute périodique du canal CCH. Ce même rôle peut être joué par le dernier véhicule de la chaîne.

Les résultats des simulations montrent de bonnes performances pour les trois propositions, en termes de capacité du canal, de taux de réception de paquets, et de temps de réponse pour les paquets urgents et ordinaires.

Offrir un mécanisme MAC à canaux multiples permet d'augmenter la capacité du réseau, réduire le temps d'écoute inutile du canal de contrôle aussi, mais avoir des temps de retour périodiques sur le canal de contrôle introduit une synchronisation naturelle qui rend très tentante l'émission par les nœuds n'ayant pas eu l'opportunité d'envoyer leur trafic de données qui s'est accumulé pendant l'intervalle d'écoute du canal de contrôle de l'envoyer en tout début de période SCH, provoquant des phénomènes de collisions, ou d'inhibition. C'est l'objet du quatrième chapitre, de proposer une méthode qui permette de gérer au mieux la façon dont on choisit ses instants d'émission de données dans les périodes autorisées.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche pour soulager la charge de trafic véhiculaire au début de l'intervalle CCH. Elle est principalement conçue pour le trafic de diffusion avec date de péremption fixe. Les nœuds commencent leur back-off à un moment fonction de leur position géographique. Nous comparons notre mécanisme avec le standard et dans le cas où les slots sont choisis de manière uniforme sur l'intervalle CCH. En outre, nous proposons une nouvelle procédure de back-off par laquelle un nœud peut diffuser son paquet dès que possible après un petit retard aléatoire uniforme. Cette modification du mécanisme standard

augmente le taux d'utilisation du canal CCH en éliminant les lacunes de temps perdues pendant l'attente faite par le back-off standard.

Les résultats des simulations indiquent que notre approche offre les meilleures performances en termes de capacité du canal et de probabilité de collision. Nous montrons également que la valeur minimale de la fenêtre de contention (5 slots) de la norme dans le mécanisme de back-off est la plus adéquate pour diffuser des messages sur CCH avec date de péremption. Enfin, notre système permet de résoudre un problème important sur la capacité du canal CCH avec simplicité et sans avoir besoin d'échange d'informations entre les véhicules.

Le problème de collision entre les paquets diffusés par les véhicules, surtout sur le canal CCH, est atténué mais n'est pas totalement supprimé. En effet, la charge des messages diffusés par les véhicules dans une zone de couverture de 1000 m peut dépasser la capacité du canal CCH limité par la durée des intervalles CCH de 46 ms.

Dans le chapitre cinq, nous proposons BANC, une nouvelle approche basée sur la technique du codage analogique (ANC) pour séparer les collisions entre les messages diffusés sur le CCH. Tandis que les autres algorithmes comme ZigZag ne sont pas adaptés au mode de diffusion, notre mécanisme peut faire face à cette situation en envoyant plus d'informations définies par deux symboles pour chaque paire de symboles successifs d'un paquet. En effet, ZigZag nécessite des accusés de réception ou de non réception pour provoquer les retransmissions de l'émetteur en cas de collision or le trafic diffusé ne permet pas l'utilisation de ces acquittements. Ces deux symboles ajoutés sont des applications des deux fonctions non-linéaires de mise en correspondance des deux symboles originaux successifs. Le coût supplémentaire n'est pas très élevé en termes de bande passante puisque les messages diffusés sur le CCH sont de petites tailles. En outre, notre technique est adaptée à la modulation QPSK, modulation la plus utilisée dans la norme IEEE 802.11p pour les réseaux véhiculaires. Les résultats des simulations montrent que BANC augmente le taux de réception des paquets et améliore la capacité du canal. Notre proposition peut finalement être vue comme un mécanisme proactif bien adapté à la situation des réseaux véhiculaires où il est préférable de réagir très vite. En effet, les topologies sont très volatiles et retransmettre à la demande plusieurs fois est un processus long.

De nombreux développements sont possibles à notre proposition. L'impact de différentes conditions de canal sur les performances de notre mécanisme pourrait être investigué. La validation en environnement réel serait aussi très importante.

Conceptuellement, notre proposition apporte une idée radicalement nouvelle par rapport à l'utilisation qui était faite jusqu'ici du codage analogique. En effet, dans toutes les propositions de codage analogique, un des deux paquets entrant en collision est supposé connu. Ce n'est pas toujours le cas et des scénarios comme les réseaux véhiculaires peuvent justement tirer parti d'un mécanisme capable de séparer deux paquets inconnus.

Finalement, ces techniques proposées peuvent être étudiées dans un même contexte et être intégrées dans une plateforme qui pourra aboutir à un algorithme exhaustif qui commence par le choix du canal, la synchronisation entre les transmissions, le choix du paquet à transmettre, la période de transmission sur chaque canal, et se termine par la technique de transmission et de réception des paquets au niveau physique.

Le concept du codage réseau analogique est une méthode importante pour minimiser l'effet des collisions surtout dans un réseau à haute densité. Des études expérimentales sont ainsi importantes d'être faites pour être plus proche du réel.

Bibliographie

- [802P] <http://standards.ieee.org/board/nes/projects/802-11p.pdf>
- [ADV06] B. van Arem, C. J. G. van Driel, and R. Visser. “The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, December 2006.
- [APC2C] L. Andreone and M. Provera, Inter-vehicle communication and cooperative systems: local dynamic safety information distributed among the infrastructure and the vehicles as “virtual sensors” to enhance road safety, <http://www.car-to-car.org>.
- [ASTM03] ASTM E2213-03, Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Road-side and Vehicle Systems—5 GHz Band Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ASTM International, July 2003.
- [B92] A.G. Burr. Comparison of coherent and noncoherent modulation in the presence of phase noise, *IEEE PROCEEDINGS-I*, Vol. 139, No. 2, APRIL 1992.
- [BA+11] A. Barbosa and al. “An adaptive Mechanism for Access Control in VANETs”, ICN 2011.
- [BE07] Jeremy J. Blum and Azim Eskandarian. “A reliable Link-Layer Protocol for robust and scalable intervehicle communications”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 8, no. 1, March 2007.
- [BSK10] F. Bai, D. Stancil, and H. Krishnan, “Toward understanding characteristics of Dedicated Short Range Communications (DSRC) from a perspective of vehicular network engineers,” in *Proc. Sixteenth Annu. Int. Conf. MobileComput. Networking (MobiCom)*, Chicago, IL, Sep. 2010.
- [C2C] <http://www.car-to-car.org>
- [C2C09] C2C-CC (2009) Car-2-Car Communication Consortium – Technical Approach. <http://www.car-to-car.org/index.php?id=8&L=0>.
- [CC+06] Chennikara-Varghese, J., Chen, W., Altintas, O., and Cai, S., Survey of Routing Protocols for Inter-Vehicle Communications, in *Mobile and Ubiquitous Systems Workshops, 2006, 3rd Annual International Conference, 2006*, pp. 1–5.

- [CJJK07] Szymon Chachulski, Michael Jennings, Sachin Katti, and Dina Katabi. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing. SIGCOMM Comput. Commun., October 2007.
- [CV+11] C. Campolo, A. Vinel, A. Molinaro, and Y. Koucheryavy, “Modeling Broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE Vehicular Ad Hoc Networks,” in *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 2, pp. 199-201, 2011.
- [DC+10] D. Deng, H. Chen, H. Chao, Y. Huang. “A Collision Alleviation Scheme for IEEE 802.11p VANETs Wireless Personal Communications”, pp. 1-13, April 2010.
- [DSRCR03] Dedicated Short Range Communications Report and Order, U.S. Federal Communications Commission, R&O FCC 03-324, Dec. 17, 2003.
- [EGH+06] T. ElBatt, S. Goel, G. Holland, H. Krishnan, and J. Parikh, Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications, ACM, VANET, 2006
- [EST11] <http://www.estinet.com/products.php>
- [FBBY02] Frenkiel, R., Badrinath, B.R., Borrás, J., and Yates, R.D., The infostations challenge: Balancing cost and ubiquity in delivering wireless data, *IEEE Personal Communications*, 7-2, 66-71, April 2002.
- [FCC03] FCC Report and Order (03-324). Federal Communications Commission.
- [FCC99] FCC Report and Order (99-305). Federal Communications Commission.
- [FC+07] Fernandez-Madriral, J.A., Cruz-Martin, E., Gonzalez, J., Galindo, C., and Blanco, J.L., Application of UWB and GPS Technologies for Vehicle Localization in Combined Indoor-Outdoor environments, in ISSPA '07: International Symposium on Signal Processing and its Applications, Sharja (U.A.E.), February 2007.
- [GK08] Shyamnath Gollakota and Dina Katabi. “Zigzag decoding: combating hidden terminals in wireless networks”. In ACM SIGCOMM, 2008.
- [GOC] Data from the GPS Operations Center. <https://gps.afspc.af.mil/gpsoc/PerformanceReports.aspx>
- [H00] J. Hamkins. An analytic technique to separate cochannel fm signals. *IEEE Transactions on Communications*, 48(11):2980-2989, 2000.
- [HFG03] F. Herzel, G. Fischer and H. Gustat, “An integrated CMOS RF synthesizer for 802.11a wireless LAN”, *IEEE J Solid-State Circuits* 38 (2003), pp. 1767-1770.

-
- [HL10] H. Hartenstein & K. P. Laberteaux, VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies, A John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2010.
- [HLL02] W.-C. Hung, K.L.E. Law, and A. Leon-Garcia, "A Dynamic Multi- Channel MAC for Ad Hoc LAN," Proc. 21st Biennial Symp. Comm., pp. 31-35, June 2002.
- [IE010] Draft Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Architecture, IEEE P1609.0/D0.9, Apr. 2010.
- [IE07] IEEE Std 802.11™-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999).
- [IE117] 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, IEEE Std. 802.11-2007, Jun. 2007.
- [IE202] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture, IEEE Std. 802-2001, Feb. 2002.
- [IE298] IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements; Part 2: Logical Link Control, IEEE Std. 802.2, May 1998, 1998 Edition (R2003), Also adopted by the ISO/IEC and redesignated as ISO/IEC 8802-2:1998.
- [IE2D9] Draft Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages, IEEE P1609.2/D9.0, May 2011.
- [IE310] IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments – Networking Services, IEEE Std. 1609.3-2010, Dec. 2010.
- [IE410] IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments- Multi-Channel Operation, IEEE Std. 1609.4-2010, Dec. 2010.
- [IEP09] IEEE P802.11 – Task Group p –
http://www.ieee802.org/11/Reports/tgp_update.htm.
- [IEP610] 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; Amendment 6: Wireless Access in Vehicular

- Environments, IEEE Std. 802.11p, Jul. 2010.
- [IEW07] IEEE COMPLETES FOURTH “WAVE” RADIO COMMUNICATION STANDARD.
- [ITS98] Intelligent Transportation Services Report and Order, U.S. Federal Communications Commission, R&O FCC 99-305, Oct. 21, 1998.
- [IW08] Ibrahim, K. and Weigle, M.C., ASH: Application-aware SWANS with highway mobility, in Proceedings of IEEE INFOCOM Workshop on Mobile Networking for Vehicular Environments (MOVE), April 2008.
- [JF10] H. Jang, W. Feng. “Network Status Detection-Based Dynamic Adaptation of Contention Window in IEEE 802.11p”, Proceedings of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, Taipei, May 2010.
- [JSZ05] Jagadeesh, G.R., Srikanthan, T., and Zhang, X.D., A map matching method for GPS-based real-time vehicle location, *Journal of Navigation*, 57, 429–440, 2005.
- [K96] Kaplan, E.D., *Understanding GPS: Principles and Applications*, Artech House, 1996.
- [KC2C] T. Kosch, Technical concept and prerequisites of car-to-car communication, München: BMW group research and technology, <http://www.car-to-car.org>
- [KE06] Gokhan Korkmaz and Eylem Ekici. "Effects of Location Uncertainty on Position-Based Broadcast Protocols in Inter-Vehicle Communication Systems," Proceedings of the Fifth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net 2006), Lipary, Italy, June 2006.
- [KE10] John B. Kenney. “Standards and Regulations”, chap. 10, H. Hartenstein, K. P. Laberteaux, “VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies”, JohnWiley & Sons Ltd, 2010.
- [Ke11] J. Kenney, “Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States”, proceedings of the IEEE, vol. 99, No.7, July 2011.
- [KF+06] King, T., Fuller, H., Transier, M., and Effelsberg, W., Dead-Reckoning for Position-Based Forwarding on Highways, in Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2006), Hamburg, Germany, March

- 2006, pp. 199–204.
- [KGGK07] Sachin Katti, Shyamnath Gollakota, and Dina Katabi. Embracing wireless interference: analog network coding. In SIGCOMM '07: Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, New York, NY, USA, ACM, 2007.
- [KHW88] Krakiwsky, E.J., Harris, C.B., and Wong, R.V.C., A Kalman Filter for Integrating Dead Reckoning, Map Matching and GPS Positioning, in Position Location and Navigation Symposium, 1988, Record. “Navigation into the 21st Century,” IEEE PLANS '88, 1988, pp. 39–46.
- [KJL09] T. Kim, S. Jung, and S. Lee. “CMMP: Clustering-Based Multi-channel MAC Protocol in VANET”, Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2009.
- [KK+11] M. Khabbazian, F.Kuhn, N. Lynch, M. Médard, and A. ParandehGheibi. MAC Design for Analog Network Coding, FOMC '11 Proceedings of the 7th ACM SIGACT/SIGMOBILE International Workshop on Foundations of Mobile Computing 2011.
- [KKBM08] Sachin Katti, Dina Katabi, Hari Balakrishnan, and Muriel Medard. Symbol-level network coding for wireless mesh networks. SIGCOMM Comput. Commun., 2008.
- [KKK05] Kukshya, V., Krishnan, H., and Kellum, C., Design of a System Solution for Relative Positioning of Vehicles Using Vehicle-to-Vehicle Radio Communications During GPS Outages, in Vehicular Technology Conference, 2005, VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd, Vol. 2, 2005, pp. 1313–1317.
- [KRH+06] Sachin Katti, Hariharan Rahul, Wenjun Hu, Dina Katabi, Muriel Medard, and Jon Crowcroft. Xors in the air: practical wireless network coding. In SIGCOMM '06: Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.
- [L+09] K. Liu, J. Guo, N. Lu, F. Lu. « RAMC: A RSU-assisted multi-channel coordination MAC protocol for VANET”, in: NiVi Workshop co-located with IEEE, Globecom, 2009.
- [LI09] "The man who gave us traffic lights". BBC. 2009-07-16.
http://www.bbc.co.uk/nottingham/content/articles/2009/07/16/john_peake_knigh

t_traffic_lights_feature.shtml.

- [LSEU] http://www.statistiques-mondiales.com/union_europeenne.htm
- [MC07] X. Ma and X. Chen, Performance analysis and enhancement of safety applications in DSRC vehicular ad hoc networks, 2007
- [ME05] A. Meier, 5.9 GHz dedicated short range communication – design of the vehicular safety communication architecture, 2005
- [MGM10] I. Maric, A. Goldsmith, and M. Médard. Analog Network Coding in the High-SNR Regime. Wireless Network Coding Conference (WiNC), 2010 IEEE.
- [MH10] Martin Haugh. “The Monte Carlo Framework, Examples from Finance and Generating Correlated Random Variables”, Monte Carlo Simulation: IEOR E4703 c 2010.
- [MLS05] T. K. Mak, K. P. Laberteaux, and R. Sengupta, “A multi-channel VANET providing concurrent safety and commercial services,” in Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET). New York, NY, USA: ACM Press, 2005.
- [MOR02] J. Moran, Wireless home networking – Wi-Fi standards, 2002, <http://www.smallbusinesscomputing.com>
- [MS+08] Jeonghoon Mo, Hoi-Sheung Wilson So, and Jean Walrand. “Comparison of Multichannel MAC Protocols”, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 7, No. 1, January 2008.
- [MT+09] F. J. Martinez, C. K. Toh, J-C Cano, C. T. Calafate, and P. Manzoni. “A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs) », WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING *Wirel. Commun. Mob. Comput.* (2009). DOI: 10.1002/wcm.859.
- [NH+05] National Highway Traffic Safety Administration, CAMP Vehicle Safety Communications, Vehicle Safety Communications Project, Task 3 Final Report, Identify Intelligent Vehicle Safety Application Enabled by DSRC, DOT HS 809 859, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, March 2005.

- [NLF07] Nakamura, E.F., Loureiro, A.A.F., and Frery, A.C., Information fusion for wireless sensor networks: Methods, models, and classifications, *ACM Computing Surveys*, 39(3), 9/1–9/55, 2007.
- [NNS6] <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>
- [OW09] S.OLARIU, M.WEIGLE. “Vehicular Networks from theory to practice”, Taylor & Francis Group, LLC,2009.
- [OW10] S.OLARIU, M.WEIGLE. “Vehicular Networks from theory to practice”, Taylor & Francis Group, LLC,2009.
- [PR88] J. Postel and J. Reynolds, A Standard for the Transmission of IP Datagrams Over IEEE 802 Networks, Internet Engineering Task Force RFC 1042, Feb. 1988.
- [PR+08] Piorkowski, M., Raya, M., Lezama Lugo, A., Papadimitratos, P., Grossglauser, M., and Hubaux, J.-P., TraNS: Realistic joint traffic and network simulator for VANETs, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review Special Issue*, April 2008.
- [RE+11] R. Reinders, E.M. van Eenennaam, G. Karagiannis, and G.J. Heijenk. “Contention Window Analysis for Beaconing in VANETs,” in IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing conference, IWCMC, 2011.
- [Res05] Resendes, R., Vehicle Infrastructure Integration Program Status, National Highway Traffic Safety Administration, 2005.
- [RM08] Rawashdeh and S. Mahmud, “Media access technique for cluster-based vehicular ad hoc networks,” Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th, pp. 1–5, Sept. 2008
- [SCB11] R. Stanica, E. Chaput, A.-L. Beylot. “Enhancements of IEEE 802.11p Protocol for Access Control on a VANET Control Channel”, Proceedings of the 46th IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), pp. 1-5, Kyoto, June 2011.
- [SCB11b] R. Stanica, E. Chaput, A.-L. Beylot. “Physical Carrier Sense in Vehicular Ad-Hoc Networks”, in Eighth IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, 2011.
- [SEC2C] G. Segarra, Activities and applications of the car 2 car communication: the Renault

vision, <http://www.car-to-car.org>.

- [SHC07] Bjorn Scheuermann, Wenjun Hu, and Jon Crowcroft. Near-optimal coordinated coding in wireless multihop networks. In CoNEXT '07: Proceedings of the 2007 ACM CoNEXT conference, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [SHJD10] L. Song, G. Hong, B. Jiao, and M. Debbah. Joint Relay Selection and Analog Network Coding Using differential Modulation in Two-Way Relay Channels, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 59, NO. 6, JULY 2010.
- [SV04] J. So and N. Vaidya, “Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using a Single Transceiver,” Proc. ACM MobiHoc, May 2004.
- [SWM07] H.W. So, J. Walrand, and J. Mo. “McMAC: A Multi-Channel MAC Proposal for Ad Hoc Wireless Networks,” Proc. IEEE Wireless Comm. and Networking Conf. (WCNC '07), Mar. 2007.
- [SY03] J. Chen, S. Sheu, and C. Yang. “A New Multichannel Access Protocol for IEEE 802.11 Ad Hoc Wireless LANs,” Proc. 14th IEEE Int'l Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Comm. (PIMRC '03), vol. 3, pp. 2291-2296, Sept. 2003.
- [SZ07] Hang Su, Xi Zhang. “Clustering-Based Multichannel MAC Protocols for QoS Provisionings Over Vehicular Ad Hoc Networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Nov. 2007, pp. 3309-3323.
- [TG00a] A. Tzamaloukas and J.J. Garcia-Luna-Aceves, “Channel-Hopping Multiple Access,” Proc. IEEE Int'l Conf. Comm. (ICC '00), June 2000.
- [TG00b] A. Tzamaloukas and J. Garcia-Luna-Aceves, “Channel-Hopping Multiple Access with Packet Trains for Ad Hoc Networks,” Proc. IEEE Device Multimedia Comm. (MoMuC '00), Oct. 2000.
- [THR03] Tian, J., Han, L., and Rothermel, K., Spatially Aware Packet Routing for Mobile Ad Hoc Inter-Vehicle Radio Networks, in ITS '03: IEEE Intelligent Transportation Systems, Vol. 2, 2003, pp. 1546-1551.
- [TK06] Tonguz, O.K. et al., On the Broadcast Storm Problem in Ad hoc Wireless Networks, in Proceedings of the IEEE International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS), 2006, pp. 1-11.

- [TRB00] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual 2000. National Research Council, Washington, D.C.
- [USDT05] U.S. Department of Transportation, Traffic Safety Facts 2005, A Compilation of Motor Vehicle Crash Data from the Fatality Analysis Reporting System and the General Estimates System, DOT HS 810 631, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, 2005.
- [VII05] US Department of Transportation, Vehicle infrastructure integration (VII) – VII architecture and functional requirements version 1.1, 2005
- [VTF11] M. C. Valenti, Don J. Torrieri and T. Ferrett. Noncoherent Physical-Layer Network Coding with FSK Modulation: Relay Receiver Design Issues, IEEE Transactions on Communications 59(9): 2595-2604 (2011).
- [W+09] S.Y. Wang et al., Improving the Channel Utilization of IEEE 802.11p/1609 Networks, IEEE WCNC, 2009.
- [WL+00] S.-L. Wu, Y. Lin, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu, “A New Multi- Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Mobile Ad Hoc Networks,” Proc. Int’l Symp. Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPAAN ’00), p. 232, Dec. 2000.
- [WL+02] S.-L. Wu, C.-Y. Lin, Y.-C. Tseng, C.-Y. Lin, and J.-P. Sheu, “A Multi-Channel MAC protocol with Power Control for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks,” The Computer J., vol. 45, no. 1, pp. 101- 110, 2002.
- [WLZ10] Q. Wang, S. Leng, H. Fu, Y. Zhang. “An Enhanced Multi-channel MAC for the IEEE 1609.4 based Vehicular Ad Hoc Networks,” in Proc. INFOCOM 2010 Workshops, San Diego, USA, March 15-19, 2010.
- [XQ+08] X. Xie, F. Wang, H. Wang, K. Li. “Adaptive multi-channel MAC protocol for dense VANET using directional antennas”, in Proceedings of Second International Conference on Future Generation Communication and Networking, vol. 2, 2008, pp. 398–401.
- [XSJ] Q. Xu, R. Sengupta, and D. Jiang, Design and analysis of highway safety communication protocol in 5.9 GHz dedicated short range communication spectrum, USA

-
- [YEY⁺04] J. Yin, T. ElBatt, G. Yeung, B. Ryu, S. Habermas, H. Krishnan, and T. Talty, Performance evaluation of safety applications over DSRC vehicular ad hoc networks, USA, VANET, 2004
- [ZR03] J. Zhu and S. Roy, MAC for dedicated short range communications in intelligent transport system, IEEE, 2003
- [ZRK04] M. Zannoth, T. Ruhlicke, and B.-U. Klepser, “A Highly Integrated Dual-Band Multimode Wireless LAN Transceiver,” IEEE J. Solid- State Circuits, vol. 39, no. 7, pp. 1191-1195, July 2004.