



**HAL**  
open science

# Architectures cross-layer PHY/MAC pour réduire l'effet de blocage de réception dans les réseaux véhiculaires ad-hoc

Basma Bouraoui

► **To cite this version:**

Basma Bouraoui. Architectures cross-layer PHY/MAC pour réduire l'effet de blocage de réception dans les réseaux véhiculaires ad-hoc. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2017. Français. NNT : 2017VALE0006 . tel-01722144

**HAL Id: tel-01722144**

**<https://theses.hal.science/tel-01722144>**

Submitted on 3 Mar 2018

**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.

Numéro d'ordre :



---

**THÈSE DE DOCTORAT**

*Pour l'obtention du grade de*

**DOCTEUR EN ÉLECTRONIQUE**

*de*

**L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRÉSIS**

*et*

**L'ÉCOLE NATIONALE D'INGÉNIEURS DE TUNIS**

**Écoles doctorales :** - Sciences Pour l'Ingénieur (France)  
- Sciences et Techniques de l'Ingénieur (Tunisie)

**Laboratoires de recherche :** - IEMN/DOAE (France)

- SERCOM

*Présentée par :* **Basma BOURAOUI**

---

**Architectures cross-layer PHY/MAC pour réduire l'effet de blocage de réception dans les réseaux véhiculaires ad-hoc**

---

Soutenue le 02/03/2017 à Valenciennes, devant le jury composé de :

**Rapporteurs :**

- M. Kosai RAOOF, *Professeur, Université du Maine, France* (Président du jury)
- M. Hichem BESBES, *Professeur, École supérieure des communications de Tunis, Tunisie*

**Examineurs :**

- Mme. Soumaya CHERKAOUI, *Professeur, Université de Sherbrooke, Canada*
- Mme. Houria REZIG, *Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie*

**Co-Directeurs :**

- M. Iyad DAYOUB, *Professeur, Université de Valenciennes, France*
- M. Rabah ATTIA, *Professeur, École Polytechnique de Tunisie, Tunisie*

**Co-Encadrants :**

- M. Mohamed GHARBI, *Maître de Conférences, Université de Valenciennes, France*
- Mme. Marie ZWINGELSTEIN, *Maître de Conférences, Université de Valenciennes, France*

**Invité :**

- M. Yves DUBOIS, *Ingénieur, VALEO-VLS, Belgique*







# Résumé

Le protocole MAC du standard IEEE 802.11p dédié aux réseaux véhiculaires interdit les transmissions simultanées dans une même zone de détection afin d'éviter d'éventuelles interférences entre les véhicules voisins. Cette interdiction entraîne un blocage temporaire de réception de données, ce qui diminue le débit global du réseau. Pour résoudre ce problème, nous proposons dans cette thèse une architecture *cross-layer* PHY/MAC basée sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices et un protocole MAC dédié afin de réduire le blocage. Ce *cross-layer* permet au récepteur de choisir la meilleure combinaison d'antennes émettrices pour améliorer le débit utile normalisé de chaque lien V2V. L'algorithme est présenté avec une méthode de détection multi-utilisateurs. Cette méthode annule les interférences entre voisins et permet à plusieurs véhicules d'émettre des données simultanément. Le protocole MAC associé assure la coordination entre les véhicules durant les communications. Les résultats de simulation montrent une amélioration du débit utile normalisé du réseau en comparaison au standard actuel. Néanmoins, ces bonnes performances diminuent avec l'augmentation de la densité véhiculaire. Pour pallier à cette baisse, nous proposons de joindre à la première solution une nouvelle architecture *cross-layer* PHY/MAC. Cette architecture est basée sur un algorithme d'adaptation de la puissance émise en fonction de la densité de voisinage du récepteur. Elle est également accompagnée par un protocole MAC dédié. Les résultats de simulation montrent que cette solution permet à plus de véhicules de communiquer simultanément et ainsi améliore significativement le débit utile normalisé notamment dans les réseaux véhiculaires denses.

**Mots clés :** *Réseau véhiculaire ad-hoc (VANET), architecture cross-layer, algorithme de sélection d'antennes, adaptation de la puissance, protocole MAC.*



# Abstract

The MAC protocol IEEE 802.11p, dedicated to vehicular ad-hoc networks VANETs, prohibits simultaneous transmissions in the same detection area, in order to avoid interference between neighboring vehicles. This prohibition causes a temporary data reception blocking, which reduces the network throughput. To reduce this adverse impact, we propose in this thesis a cross-layer design PHY/MAC based on a transmit antennas selection algorithm jointly with a dedicated MAC protocol. This design allows receivers to select the best combination of transmit antennas to improve the throughput of each V2V link. The algorithm is presented with a multi-user detection method, which cancels neighbor's interference and allows vehicles to transmit data simultaneously. The associated MAC protocol ensures the coordination between vehicles during the simultaneous transmission period. The simulation results show a significant network throughput improvement compared to the conventional case. However, this improvement is less important in dense VANETs. For this purpose, we propose to join a cross-layer design PHY/MAC based on a transmit power adaptation algorithm. This design allows transmitters to choose the adequate power level based on corresponding receivers density. The simulation results show that this solution allows more vehicles to communicate simultaneously and thus improves the network throughput, in particular in dense VANETs.

**Keywords :** *Vehicular ad-hoc network (VANET), cross-layer design, antennas selection algorithm, power adaptation, protocol MAC.*



# Table des matières

Résumé . . . . .	iii
Abstract . . . . .	v
Table des matières . . . . .	vi
Table des figures . . . . .	x
Liste des tableaux . . . . .	xii
Liste des algorithmes . . . . .	xii
Introduction générale . . . . .	2
<b>1 État de l'art sur les réseaux véhiculaires . . . . .</b>	<b>6</b>
1.1 Introduction . . . . .	6
1.2 Vue d'ensemble sur les réseaux véhiculaires . . . . .	8
1.2.1 Les systèmes de communication V2X . . . . .	8
1.2.2 Types d'applications . . . . .	9
1.2.3 Caractéristiques et défis . . . . .	10
1.3 Standardisations dans les VANETS . . . . .	13
1.4 Propagation radio dans l'environnement véhiculaire . . . . .	16
1.4.1 Zones de communication . . . . .	16
1.4.2 Affaiblissement de parcours . . . . .	17
1.4.3 Modèle <i>Shadowing</i> . . . . .	18
1.4.4 Évanouissement par trajets multiples . . . . .	19
1.4.5 Étalement Doppler . . . . .	23
1.5 Simulateurs de mobilité dans les réseaux véhiculaires . . . . .	24
1.5.1 Générateurs de mobilité VANETS . . . . .	24
1.5.2 Comparaison de générateurs de mobilité VANETS . . . . .	27

1.6	Conclusion . . . . .	27
<b>2</b>	<b>Problématiques des réseaux véhiculaires . . . . .</b>	<b>30</b>
2.1	Introduction . . . . .	30
2.2	Couche physique : Transmission et Détection . . . . .	31
2.2.1	Techniques de transmission à antennes multiples . . . . .	31
2.2.2	Techniques de détection à antennes multiples . . . . .	33
2.3	Couche liaison de données : Protocoles et Problématiques . . . . .	35
2.3.1	Protocole MAC IEEE 802.11p . . . . .	35
2.3.2	Problématiques du protocole MAC . . . . .	40
2.3.3	Solutions dans la littérature pour le problème de blocage de réception . . . . .	43
2.4	Conclusion . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Architecture cross-layer basée sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices . . . . .</b>	<b>48</b>
3.1	Introduction . . . . .	48
3.2	Cross-layer avec sélection d'antennes . . . . .	49
3.2.1	Algorithme de sélection d'antennes émettrices . . . . .	49
3.2.2	Détection de données dans un réseau multi-utilisateurs . . . . .	51
3.3	Protocole MAC proposé . . . . .	53
3.3.1	Mécanisme du protocole proposé . . . . .	53
3.3.2	Durée d'échange des paquets de contrôle . . . . .	58
3.3.3	Spécification du protocole MAC dans un réseau VANET . . . . .	59
3.4	Résultats de simulations . . . . .	59
3.4.1	Environnement de simulation . . . . .	60
3.4.2	Résultats de simulation . . . . .	63
3.5	Conclusion . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Architecture cross-layer basée sur un algorithme d'adaptation de la puissance d'émission . . . . .</b>	<b>70</b>
4.1	Introduction . . . . .	70
4.2	Motivations . . . . .	71
4.2.1	Algorithme d'adaptation de puissance de <i>Rawat</i> . . . . .	71
4.2.2	Algorithme d'adaptation de puissance de <i>Caizzone</i> . . . . .	72

---

4.3	Cross-layer PHY/MAC avec adaptation de puissance . . . . .	73
4.3.1	Algorithme d'adaptation de puissance émise . . . . .	74
4.3.2	Protocole MAC proposé . . . . .	76
4.4	Résultats de simulation . . . . .	77
4.5	Conclusion . . . . .	83
	<b>Conclusion générale et perspectives . . . . .</b>	<b>86</b>
	<b>Liste de Publications . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>91</b>



# Table des figures

1.1	Communications V2V, V2I et V2V2I. . . . .	8
1.2	La pile protocolaire WAVE. . . . .	13
1.3	Architecture ETSI. . . . .	14
1.4	Architecture CLAM. . . . .	15
1.5	Zones d'émission, de détection et d'interférences. . . . .	16
1.6	<i>Path-loss</i> : <i>Free-space</i> , <i>Two-ray-ground</i> . . . . .	18
1.7	Puissance reçue en fonction de la distance : affaiblissement de parcours, <i>Shadowing</i> , évanouissement par trajets multiples. . . . .	20
1.8	Fonction de densité de probabilité d'une distribution Rayleigh. . . . .	20
1.9	Fonction de densité de probabilité d'une distribution Rice. . . . .	21
1.10	Fonction de densité de probabilité de Nakagami pour différentes valeurs de $m$ . . . . .	22
1.11	Effet Doppler pour une voiture en mouvement. . . . .	23
2.1	Canal MIMO. . . . .	32
2.2	Les trames IEEE 802.11p. . . . .	36
2.3	Les différents espacements IFS. . . . .	37
2.4	Le protocole MAC IEEE 802.11p. . . . .	38
2.5	Déroulement du protocole <i>Stop-and-Wait</i> dans le cas où le paquet 2 est perdu. . . . .	38
2.6	Déroulement du protocole <i>Go-Back-N</i> où $W = 3$ paquets et dont le paquet 2 est perdu. . . . .	39
2.7	Déroulement du protocole <i>Selective-Repeat</i> dans le cas où le paquet 2 est perdu. . . . .	40
2.8	Scénario 1 : Véhicule exposé. . . . .	41
2.9	Scénario 2 : Véhicule caché. . . . .	42
2.10	Scénario 3 : Véhicule bloqué. . . . .	43
2.11	Le protocole DUCHA. . . . .	45
3.1	Exemple de liste AS. . . . .	51
3.2	Exemple de scénario VANET avec 4 véhicules. . . . .	52
3.3	Diagramme de la phase d'échange de la liste d'antennes AS. . . . .	55

3.4	Diagramme de séquence de la phase de négociation. . . . .	56
3.5	Diagramme de séquence de la phase d'émission de données. . . . .	57
3.6	Exemple du contenu des paquets de contrôle. . . . .	57
3.7	Durée d'échange de paquets de contrôle. . . . .	58
3.8	Scénario 1 de carte routière : zone urbaine. . . . .	61
3.9	Scénario 2 de carte routière : autoroutes. . . . .	61
3.10	Débit utile normalisé du premier scénario (100 véhicules, vitesses de circulation urbaine). . . . .	63
3.11	Taux d'antennes sélectionnées du premier scénario en fonction du SNR d'entrée. L'algorithme de sélection d'antennes émettrices et le protocole MAC IEEE 802.11p sont appliqués. . . . .	64
3.12	Taux d'antennes sélectionnées du premier scénario en fonction du SNR d'entrée. L'algorithme de sélection d'antennes émettrices et le nouveau protocole MAC sont appliqués. . . . .	65
3.13	Débit utile normalisé du premier scénario (30 véhicules, vitesses de circulation urbaine). . . . .	65
3.14	Taux d'antennes sélectionnées du deuxième scénario en fonction du SNR d'entrée. L'algorithme de sélection d'antennes émettrices et le protocole MAC IEEE 802.11p sont appliqués. . . . .	67
3.15	Taux d'antennes sélectionnées du deuxième scénario en fonction du SNR d'entrée. L'algorithme de sélection d'antennes émettrices et le nouveau protocole MAC sont appliqués. . . . .	67
3.16	Débit utile normalisé du premier scénario (30 véhicules, vitesses sur autoroutes). . . . .	68
4.1	Zone d'émission de T sans adaptation de la puissance émise. . . . .	74
4.2	Zone d'émission de T avec adaptation de la puissance émise. . . . .	75
4.3	Grille de Manhattan. . . . .	78
4.4	Débit utile normalisé par lien V2V dans un réseau de 40 véhicules : sans ASA et sans TPA, avec ASA et sans TPA, avec ASA et avec TPA. . . . .	80
4.5	Taux d'antennes émettrices sélectionnées dans un réseau de 40 véhicules. Les algorithmes de sélection d'antennes émettrices et d'adaptation de la puissance émise sont appliqués. . . . .	80
4.6	Taux de véhicules en transmissions simultanées dans un réseau de 40 véhicules. . . . .	81
4.7	Débit utile normalisé par lien V2V dans un réseau de 40 et de 100 véhicules : avec TPA ou sans TPA. . . . .	82
4.8	Débit utile normalisé dans un réseau de 40 véhicules avec différentes valeurs de sensibilité du récepteur. . . . .	83

# Liste des tableaux

1.1	Quelques valeurs typiques de l'exposant d'affaiblissement de parcours $\alpha$ . . . . .	19
1.2	Quelques valeurs typiques de la variance du modèle <i>Shadowing</i> $\sigma_{dB}$ (dB). . . . .	19
1.3	Comparaison entre générateurs de trafic pour VANETs. . . . .	28
1.4	Comparaison de contraintes de mouvement utilisées par les générateurs VANETs. . . . .	28
3.1	Paramètres de paquets de contrôle. . . . .	62
3.2	Paramètres de simulation 1. . . . .	62
4.1	Recherche de la puissance d'émission en fonction de la zone de transmission selon [74]. . . . .	72
4.2	Paramètres de simulation 2. . . . .	79





# Liste des algorithmes

3.1	Algorithme proposé de sélection d'antennes émettrices . . . . .	60
4.2	Algorithme d'adaptation de la puissance d'émission de <i>Rawat</i> [74]. . . . .	73
4.3	Algorithme d'adaptation de la puissance d'émission de <i>Caizzone</i> [76]. . . . .	73
4.4	Algorithme d'adaptation de la puissance d'émission proposé. . . . .	76
4.5	Algorithme de sélection d'antennes et d'adaptation de puissance d'émission proposé. . . . .	77







# Introduction générale

---

Dans le bilan de l'association internationale de la sécurité routière ASIRT (*Association for Safe International Road Travel*), chaque année 1.24 millions décès et 50 millions de blessés dans le monde sont enregistrés sur les routes. Les programmes de prévention, les campagnes de sensibilisation et les sévères sanctions de la violation du code de la route n'ont pas suffi pour éviter ces accidents. Aujourd'hui, le monde compte sur les Systèmes de Transport Intelligent STI (*Intelligent Transportation Systems ITS*) pour sauver des vies et éviter les drames de la route. Plusieurs opérateurs de l'industrie, des télécommunications et des réseaux, les milieux universitaires et certains gouvernements consacrent d'importantes ressources dans des projets nationaux et internationaux tels que CVIS [1], SAFESPOT [2], CarCoDe [3] et SeVeCom [4] pour le déploiement d'une infrastructure routière et des véhicules connectés.

Les véhicules connectés doivent partager dans un réseau véhiculaire ad-hoc (*Vehicular Ad Hoc Network VANET*) des informations routières en intra-véhiculaire, de véhicule-à-véhicule V2V où de véhicule-à-infrastructure V2I pour rendre le trajet plus sûr et plus confortable. Une large gamme d'applications s'offrent telles que les applications de sécurité, de gestion de trafic routier, d'aide à la conduite, de confort et de divertissement [5, 6]. Leur utilisation nécessite un accès fréquent au canal pour échanger des informations. Le protocole MAC IEEE 802.11p du standard WAVE (*Wireless Access Vehicular Environment WAVE*) [7] dédié aux VANETs, gère l'accès au canal et impose un accès alternatif. Il interdit les transmissions simultanées des données au sein d'une même zone de couverture afin d'éviter d'éventuelles interférences entre voisins communicants. L'inconvénient est que cela engendre un blocage temporaire de réceptions qui est incompatible avec les exigences des applications VANETs en termes de continuité de service.

## Contributions

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au problème de blocage de réception dans les réseaux véhiculaires ad-hoc.

Notre première contribution porte sur le développement et l'adaptation d'une solution existante à un environnement véhiculaire permettant à plusieurs véhicules dans le réseau de transmettre simultanément des données [8]. Les caractéristiques des réseaux VANETs nécessitent de tenir compte de plusieurs facteurs : i) la variation temporelle du canal ; ii) la durée d'échange de paquets de contrôle ; iii) la variation temporelle de la puissance reçue ; iv) les vitesses des véhicules ; v) la densité du réseau. Cette solution est basée sur une architecture *cross-layer* PHY/MAC utilisant un algorithme de sélection d'antennes émettrices et un protocole de la couche MAC dédié. En effet, chaque récepteur est amené à chercher la meilleure combinaison d'antennes émettrices en termes de débit utile normalisé (en anglais *throughput*), en se basant sur une estimation du canal. Cette sélection est soumise à une condition nécessaire permettant par la suite l'annulation des éventuelles d'interférences. Le protocole MAC proposé assure la coordination entre les véhicules pendant le temps de la communication.

Notre deuxième contribution consiste à améliorer cette première solution en ajoutant un second *cross-layer* PHY/MAC. Cette nouvelle architecture est basée sur un algorithme d'adaptation de la puissance émise en fonction de la densité de voisinage du récepteur. Elle est conjointement proposée avec un nouveau protocole MAC pour gérer à la fois l'algorithme de sélection d'antennes émettrices et l'algorithme d'adaptation de la puissance. Cette solution permet de réduire les zones d'interférences et d'augmenter le nombre de véhicules susceptibles de communiquer simultanément.

## Organisation du manuscrit

Ce manuscrit de thèse est composé de quatre chapitres :

Le chapitre 1 donne une vue d'ensemble sur les réseaux véhiculaires. Nous présentons, dans la première partie, les différents types d'applications, les caractéristiques et les défis des réseaux VANETs. La seconde partie est dédiée aux standards adoptés pour ces réseaux. Ensuite, nous consacrons la troisième partie aux modèles de propagation radio dans les VANETs (l'affaiblissement de parcours, Shadowing, les évanouissements par trajets multiples et l'étalement Doppler). Puis, dans la quatrième partie, nous présentons différents simulateurs de mobilité capables de reproduire un environnement véhiculaire. Cette partie est synthétisée par un tableau comparateur

de ces simulateurs.

Dans le chapitre 2, nous exposons les différentes techniques de transmission (SISO, SIMO, MISO et MIMO) ainsi que les techniques de détection et d'annulation des interférences (ZF, MMSE, V-BLAST et ML). Ensuite, nous abordons les problématiques liées à l'utilisation du protocole MAC IEEE 802.11p comme, par exemple, le problème du nœud caché, le problème du nœud exposé, les limitations du vecteur NAV et le problème du blocage de réception. Puis, nous nous intéressons plus particulièrement au problème du blocage et nous présentons trois solutions de la littérature pour réduire l'effet contraignant du blocage dans les réseaux ad-hoc.

Le chapitre 3, présente une solution pour réduire l'effet de blocage dans les réseaux VANETs. Nous proposons un *cross-layer* basé sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices conjointement avec un nouveau protocole MAC. Ce *cross-layer* permet au récepteur de choisir la meilleure combinaison d'antennes émettrices (au niveau de la couche PHY) pour améliorer le débit utile normalisé de chaque lien V2V (au niveau de la couche MAC). L'algorithme est présenté avec une méthode de détection multi-utilisateurs qui permet à plusieurs véhicules d'émettre des données simultanément sans craindre les interférences des autres véhicules en communication. Le protocole MAC associé assure la coordination entre les véhicules pendant le temps de la communication. L'environnement véhiculaire de simulation est généré avec SUMO [9] et OpenStreetMap [10]. Le chapitre se termine avec une conclusion qui synthèse les résultats obtenus.

Dans le chapitre 4, nous proposons d'améliorer d'avantage le débit utile normalisé dans les réseaux VANETs denses. Nous associons à l'approche proposée dans le chapitre 3 un *cross-layer* PHY/MAC basé sur l'adaptation de puissance émise dont l'objectif est la réduction des zones d'interférences et la libération des véhicules restés bloqués. Dans cette architecture, la couche MAC évalue la densité de voisinage du récepteur pour l'adaptation de puissance émise à la couche PHY. Nous consacrons une première partie du chapitre à la présentation de quelques algorithmes d'adaptation de la puissance émise décrits dans la littérature. Ensuite, dans la deuxième partie, nous présentons l'algorithme proposé ainsi que le nouveau protocole MAC de gestion des deux architectures *cross-layer*. Puis, dans la troisième partie, nous étudions les performances obtenues dans différents scénarios VANETs sur la grille de Manhattan. Finalement, nous finissons ce chapitre par quelques conclusions.

Ce manuscrit de thèse se termine avec une conclusion générale qui présente une synthèse de nos contributions, les résultats obtenus et quelques perspectives que nous avons tracées pour la suite de ce travail.





# CHAPITRE 1

## État de l'art sur les réseaux véhiculaires

---

### 1.1 Introduction

Les véhicules connectés sont considérés comme une technologie clé permettant d'améliorer la sécurité routière et favoriser l'émergence des systèmes de transport intelligent (*Intelligent Transportation Systems* ITS). Grâce à l'utilisation des technologies de communication sans fil, le déploiement de ces systèmes va permettre aux véhicules de communiquer entre eux et avec l'infrastructure routière afin d'éviter d'éventuels accidents et assurer plus de confort au conducteur et à ses passagers. Les réseaux véhiculaires ad-hoc (*Vehicular Ad-hoc Networks* VANETs) sont une approche des systèmes ITS. Ils se distinguent des réseaux mobiles ad-hoc (*Mobile Ad-hoc Networks* MANETs<sup>1</sup>) par la mobilité élevée des véhicules, le changement rapide de la topologie et la capacité de prédiction des trajets. L'objectif principal de la mise en place de ces réseaux est l'amélioration de la sécurité routière par des moyens de communication, néanmoins d'autres applications sont envisagées telles que les applications d'aide à la conduite et les applications de confort.

Les VANETs ne sont pas qu'une simple application des MANETs mais ils imposent d'autres défis et doivent surmonter plusieurs problèmes qui nécessitent de la recherche dans ce domaine.

---

1. *Mobile Ad-hoc Network* : un réseau mobile ad-hoc est un système autonome composé de stations mobiles inter-connectées par des liens sans fil sans infrastructure centralisée.

Par ailleurs, plusieurs projets de recherche et développement ont été lancés. Nous citons :

### Projets européens

- **SeVeCom**<sup>2</sup> (2006-2009) [4] propose une solution pour répondre aux exigences sécuritaires des réseaux véhiculaires. En particulier, il traite trois aspects : l'identification des diverses menaces, la spécification d'une architecture et des mécanismes de sécurité et la définition des fonctions de cryptographie.
- **CVIS**<sup>3</sup> (2006-2010) [1] est centré sur l'amélioration du trafic routier. Il vise à développer, améliorer et valider l'architecture de communication CALM (*Communication Access for Land Mobiles*) spécifiée par l'ISO (*International Organization for Standardization*) [11] (voir paragraphe 1.3).
- **SAFESPOT** (2006-2010) [2] est centré principalement sur la sécurité routière. Son objectif est de développer une cartographie locale dynamique montrant en temps réel sur une carte numérique les évolutions des véhicules.
- **CarCoDe** (2013-2015) [3] définit une plate-forme ouverte permettant de fournir rapidement et automatiquement par divers canaux de communication sans fil, les informations nécessaires pour plus de sécurité, un meilleur confort de conduite et un meilleur environnement.
- **SafeCOP**<sup>4</sup> (2016-2019) [12] développe des méthodes et des outils qui serviront à produire des preuves d'assurance de la sécurité nécessaires pour certifier les fonctions coopératives. Il contribue également à l'élaboration de nouvelles normes et règlements, en fournissant aux autorités de certification et aux comités de normalisation les solutions scientifiquement nécessaires.

### Projets américains

- **VSC-2**<sup>5</sup> (2005-2009) a pour objectif d'estimer le potentiel des applications de sécurité et de déterminer les besoins de communication véhicule-à-véhicule.
- **VII**<sup>6</sup> (2005-2009) a pour objectif de fournir aux conducteurs des informations routières telles que les avertissements de conditions dangereuses et les collisions, les embouteillages et les conditions météorologiques.

---

2. *Secure Vehicular Communication.*

3. *Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems.*

4. *Safety-related Cooperating Cyber-Physical Systems.*

5. *Vehicle Safety Communication.*

6. *Vehicle Infrastructure Integration.*

Dans la suite du chapitre, nous donnons une vue d'ensemble sur les réseaux véhiculaires. Nous y présentons les différentes applications, les caractéristiques et les défis. Ensuite, nous décrivons, dans la seconde partie, les modèles de propagation radio notamment l'affaiblissement de parcours, le *Shadowing*, l'évanouissement à trajets multiples et l'étalement Doppler. Dans la troisième partie, nous présentons quelques standards dédiés aux VANETs. Puis, nous consacrons la quatrième partie pour donner un aperçu sur les différents simulateurs de mobilité capables de reproduire un environnement véhiculaire. Finalement, nous terminons ce chapitre par quelques conclusions.

## 1.2 Vue d'ensemble sur les réseaux véhiculaires

Les réseaux véhiculaires ad-hoc (VANETs) établissent des communications entre les véhicules et entre les véhicules et les équipements de la route selon les domaines d'applications [13]. Les VANETs se comportent d'une manière caractéristique et se distinguent des réseaux MANETs. Nous présentons, dans ce paragraphe, les différents systèmes de communication véhiculaire, les diverses applications et les caractéristiques et défis des réseaux véhiculaires.

### 1.2.1 Les systèmes de communication V2X

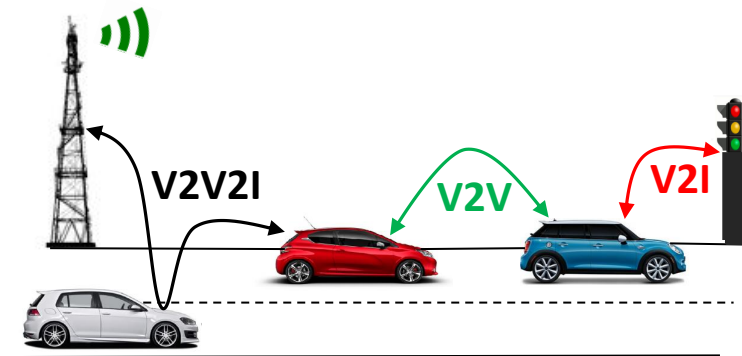


FIGURE 1.1 – Communications V2V, V2I et V2V2I.

L'architecture des VANET, comme illustrée dans la figure 1.1, offre trois possibilités de communication V2X [14] :

- **Communication Véhicule-à-Véhicule V2V** : Un véhicule peut recevoir, émettre et échanger des informations de trafic telles que les conditions de circulation et les accidents de la route, sans passer par les supports de l'infrastructure routière. Une communication

V2V à un seul saut<sup>7</sup> se fait directement si les deux entités communicantes se situent dans la même zone de couverture. Dans le cas où elles sont distantes, la communication se fera par de multiples sauts en se servant des autres véhicules dans les alentours comme des relais de communication.

- **Véhicule-à-Infrastructure V2I** : Une communication V2I est un échange d'information entre un véhicule et l'infrastructure routière (*Road Side Units* RSU), tels qu'un feu tricolore, une station de base ou un panneau de signalisation intelligent. Il est aussi possible qu'un véhicule établisse une connexion avec la RSU, se connecte puis communique avec des réseaux externes comme l'Internet.
- **Communication hybride V2V2I** : Elle combine à la fois les communications véhicule-à-véhicule (V2V) et véhicule-à-infrastructure (V2I). Dans ce scénario, un véhicule peut communiquer à la fois avec l'infrastructure routière ou un autre véhicule, soit avec un seul saut ou de multiples sauts en fonction de la distance. Elle permet les communications à longue distance et aussi celles avec les véhicules en dehors de la zone de couverture.

### 1.2.2 Types d'applications

Les VANETs ont été proposés principalement pour des applications de sécurité, mais au fil du temps de nombreuses applications ont été envisagées et étudiées notamment dans le but de rendre le voyage plus agréable [5,6]. Les applications VANETs peuvent être classées en plusieurs catégories :

#### Applications de sécurité

La principale motivation pour le développement de réseaux véhiculaires ad-hoc est d'éviter d'éventuels accidents de la route. Un véhicule équipé de différents capteurs permet de prévenir le conducteur en cas de collisions ou de travaux routiers, de détecter des obstacles et de diffuser des informations météorologiques en temps réel. Les messages d'avertissement seront envoyés à travers une communication V2I ou V2V pour alerter tous les conducteurs susceptibles d'être en danger. En 2006, plusieurs de ces applications ont été mises en place aux États Unis, telles que les feux de circulation intelligents, les alertes de vitesse excessive, le freinage d'urgence, les avertisseurs de collision et les avertisseurs de changement de voie [15].

---

7. Dans un réseau à un seul saut, tous les nœuds sont voisins les uns des autres.

### Applications de gestion du trafic routier

Ces applications ont pour objectif d'équilibrer la circulation des véhicules sur les routes et d'éviter des embouteillages. Elles minimisent la durée du voyage et la consommation de l'énergie. Parmi ces applications, nous citons les applications de surveillance du trafic, de l'ordonnancement de feux de signalisation et le Platooning<sup>8</sup>.

### Applications pour les systèmes d'aide à la conduite

Les réseaux de véhicules peuvent être également utilisés pour des applications d'aide à la conduite, en fournissant aux conducteurs des informations qu'ils pourraient avoir manquées ou pourraient ne pas être encore en mesure de les avoir. Parmi ces applications, nous citons les applications d'aide au dépassement, la prévention des sorties d'autoroutes, la détection et alerte de la congestion du trafic, les avertisseurs d'embouteillages, le rapprochement d'un péage, etc.

### Applications de confort ou de divertissement

Ces applications sont destinées à améliorer le confort du conducteur et ses passagers, elles fournissent essentiellement des services tels que l'accès à l'internet mobile, la messagerie, les jeux en réseau, le téléchargement de musique et de vidéo, etc.

### 1.2.3 Caractéristiques et défis

Nous présentons, dans ce paragraphe, les principales caractéristiques des VANETs et les défis à relever.

#### Caractéristiques

Les caractéristiques principales des VANETs, qui doivent être prise en compte par toute solution dédiée, sont [16] :

**Forte mobilité** Les véhicules ont tendance à rouler à des vitesses élevées de l'ordre de 50 km/h en milieu urbain et à plus de 100 km/h en autoroute. Ils peuvent également se déplacer dans différentes directions sur des trajets prédictibles. Ainsi, ils peuvent rapidement rejoindre ou quitter

---

8. Cette technique permet de raccourcir les distances entre les véhicules grâce à une communication permanente. Les véhicules dotés des techniques nécessaires forment des colonnes serrées et se déplacent les uns derrière les autres dans le but d'optimiser l'espace routier.

le réseau dans un laps de temps court, conduisant à des changements de topologie fréquents et rapides. Les temps de connexion sont courts en particulier entre les véhicules à vitesses élevées et dans des directions opposées.

**Diversité de la densité** La densité des VANETs varie en fonction du temps et du lieu. Par exemple, en centre-ville la densité des véhicules est beaucoup plus importante qu'en zones rurales ainsi que pendant les heures de pointe les VANETs sont considérablement plus denses que pendant la nuit.

**Répartition du réseau** Dans les VANETs à faible densité, les véhicules ont tendance à se déplacer dans des groupes isolés non connectés les uns aux autres. Certaines communications à multiples sauts ne peuvent être assurées de bout-en-bout.

**Connectivité intermittente** La vitesse élevée des véhicules est l'une des caractéristiques des réseaux véhiculaires. Une conséquence directe de la forte mobilité et des obstacles de l'environnement est une connectivité intermittente. Le lien de communication V2X souffre d'une dysconnectivité fréquente à cause de la forte mobilité qui éloigne les deux entités communicantes rapidement tandis que la présence des obstacles empêche la propagation du signal.

**Bande de fréquence limitée** La bande de DSRC (Dedicated Short Range Communications) pour les VANET est entre 5,850 à 5,925 GHz. La largeur totale de la bande est de seulement 75 MHz qui peut être considérée comme limitée [17].

**Puissance d'émission limitée** Le standard WAVE dédié aux réseaux véhiculaires (voir paragraphe 1.3) limite la puissance de transmission à 33 dBm (équivalent à 2W), sauf dans certains cas d'urgence ou de sécurité du public, il est autorisé à émettre avec une puissance plus élevée.

**Énergie** Contrairement aux réseaux MANETs où l'énergie disponible représente un facteur limitant majeur, les VANETs ne disposent pas de contrainte d'énergie. Ils sont alimentés par le système d'alimentation du véhicule.

**Broadcast storm** Les VANETs, semblablement aux MANETs, souffrent du problème de *broadcast storm* ou tempête de diffusion dû à la saturation du réseau après plusieurs diffusions de paquets. Les applications VANETs motivent les entités à échanger des informations entre elles. Par

conséquent, l'échange d'information devient fréquent et redondant et lorsque deux ou plusieurs nœuds tentent de rediffuser le même message en même temps, la collision de données se produit, ce qui conduit à leur perte et à une baisse de la fiabilité.

## Défis

Les caractéristiques spécifiques des VANETs imposent plusieurs défis. Parmi ceux-ci nous citons :

**Qualité de service** Le terme de qualité de service (QoS) est utilisé pour exprimer le niveau de performance fourni aux utilisateurs. Les niveaux élevés de QoS demandent souvent une réservation importante des ressources et une infrastructure suffisante, ce qui ne peut pas être garanti dans des environnements ad-hoc dynamiques tels que les VANETs en raison du manque inhérent d'infrastructure et du changement rapide de topologie. La plupart des stratégies de routage visent à fournir des liens de communication plus solides entre les entités et tentent de minimiser le temps nécessaire pour reconstruire une connexion interrompue. Cependant, des facteurs tels que la vitesse des véhicules, leurs positionnements, la distance entre eux et la fiabilité peuvent affecter la qualité de transmission.

**Latence** Le temps entre la production d'un événement (par exemple un freinage d'urgence ou un accident) et la réception d'une information par l'application de sécurité des véhicules de réception doit être faible.

**Sécurité** Lors d'une communication entre deux ou plusieurs entités (véhicule ou infrastructure), des intrus ne devront pas être en mesure de comprendre des informations confidentielles échangées. Par ailleurs, dans certaines applications VANETs, le récepteur doit avoir certaines informations concernant l'émetteur telles que son identité et ses coordonnées géographiques. L'authentification des véhicules permet de contrôler les niveaux d'autorisation de chaque utilisateur et empêche toute attaque Sybil<sup>9</sup> [18].

**Normalisation** Toute information nécessaire, utile et pertinente doit être partagée entre tous les utilisateurs de la route afin qu'ils puissent bénéficier des avantages offerts par les applications VANETs, Ainsi, l'uniformisation des communications entre tous les types et modèles de véhicules demeure évidente.

---

9. Une attaque Sybil dans la sécurité informatique est une attaque de pirate sur un *peer-to-peer*.

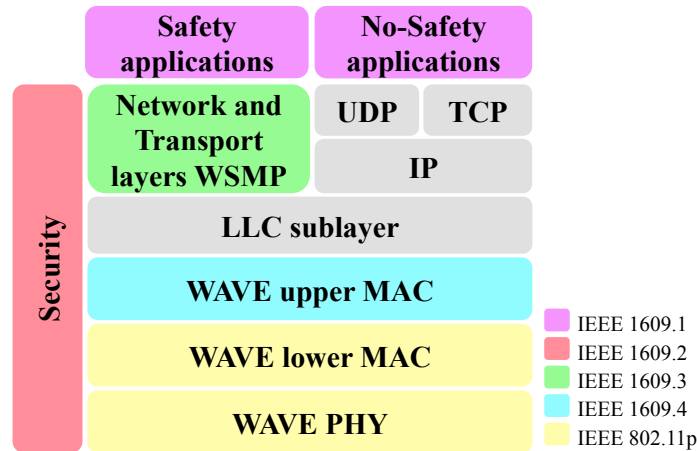


FIGURE 1.2 – La pile protocolaire WAVE.

**ROUTAGE** Dans les réseaux ad-hoc, les protocoles de routage sont définis pour établir un chemin entre deux entités distantes. Cependant, dans les réseaux VANETs, les protocoles de routage sont confrontés aux particularités uniques des VANETs (par exemple une connectivité intermittente, une topologie très dynamique, etc.).

**Adressage géographique** L'adressage géographique ou *geocasting* est principalement utilisé pour définir d'éventuels récepteurs dans une zone géographique précise [19]. Par exemple, en cas d'accident seuls les véhicules dans le sens de l'accident doivent être informés. Toute information inutile envoyée peut engendrer une surcharge du réseau et des dérangements aux conducteurs.

**Infrastructure** Pour répondre aux besoins des applications VANETs aux communications V2I, une infrastructure routière doit être présente.

### 1.3 Standardisations dans les VANETS

Plusieurs organisations se sont investies dans la normalisation des technologies véhiculaires et leurs architectures afin de répondre aux exigences de ces réseaux. Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu sur quelques architectures standardisées

#### Architecture WAVE

WAVE (*Wireless Access Vehicular Environment* WAVE) est une extension du standard américain IEEE 802.11 [20]. Elle répond aux exigences des systèmes de transport intelligents ITS.



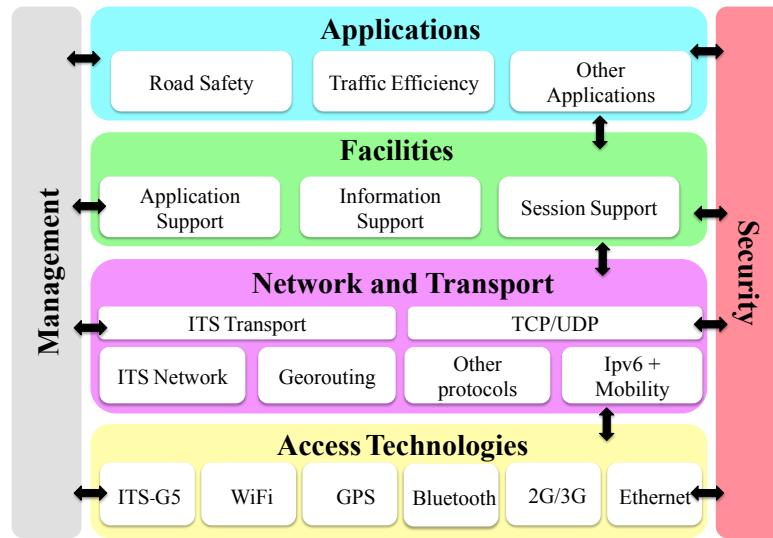


FIGURE 1.3 – Architecture ETSI.

La pile protocolaire WAVE est décrite dans la figure 1.2. Elle associe le standard IEEE 802.11p et les quatre standards IEEE 1609.1, 1609.2, 1609.3, et 1609.4.

- **IEEE 802.11p** est une version adaptée du standard IEEE 802.11 [20] pour supporter les systèmes de transports intelligents [7]. Ce standard décrit les couches physique et MAC pour les environnements véhiculaires [21]. Il est principalement responsable de la spécification du matériel, la modulation et le codage.
- **IEEE 1609.1** décrit le service de gestion de ressources (*Resource Manager RM*) et définit les formats de messages et le mode de stockage des données utilisé par la couche application [22].
- **IEEE 1609.2** décrit les services de sécurité dans le système WAVE et définit le format des messages sécurisés DSRC. Il définit aussi les propriétés de sécurité à assurer par les véhicules telles que l'authenticité et l'intégralité [23].
- **IEEE 1609.3** décrit les fonctions des couches réseau et transport pour les communications WAVE et définit le message WSA (*WAVE Service Advertisement*) pour annoncer la disponibilité de services DSRC [24].
- **IEEE 1609.4** introduit le modèle d'accès multicanal de la couche physique IEEE 802.11p [25].

### Architecture ETSI

Cette architecture est proposée par l'institut européen des normes de télécommunications (*European Telecommunications Standards Institute ETSI*) [26]. Elle est composée de quatre couches :

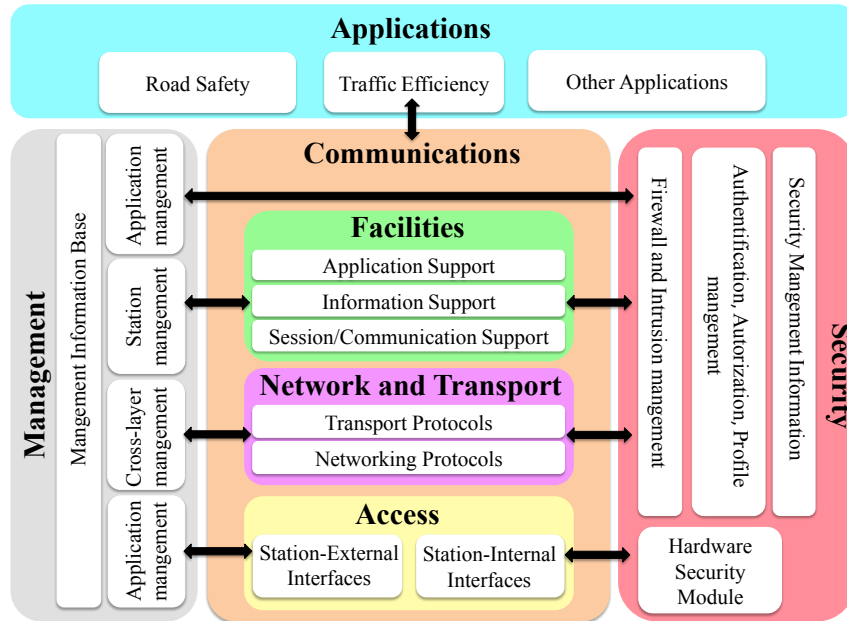


FIGURE 1.4 – Architecture CLAM.

*Access Technologies*, *Facilities*, *Network and Transport* et *Application*, et deux plans verticaux : *Management* et *Security* (voir figure 1.3). La couche la plus basse est basée sur de légères modifications du standard IEEE 802.11p. La couche *Network and Transport* ont plus de fonctionnalités pour soutenir plusieurs scénarios de communication. La couche *Facilities* prend en considération plus d'applications.

## Architecture CLAM

L'architecture CLAM est proposée par la norme ISO [11]. Son objectif est de développer un protocole capable de connecter les véhicules et l'infrastructure routière d'une manière continue (V2V, V2I, I2I et V2O<sup>10</sup>). L'idée est d'utiliser des standards déjà existants. Plusieurs projets sont impliqués dans le développement de ce concept tels que SAFESPOT [2] et CVIS [1]. Les méthodes de transmission utilisées par CALM sont basées sur plusieurs supports de communication tels que DSRC [27], Infrared [28], GSM [29] et WiMAX [30]. La figure 1.4 présente l'architecture en couches du CLAM.

10. V2O : *Vehicle-to-Other Interfaces* : Communication entre un véhicule et toute sorte d'interface.

## 1.4 Propagation radio dans l'environnement véhiculaire

L'affaiblissement de parcours est dû à la propagation de l'onde électromagnétique dans l'espace libre. Il traduit l'atténuation de la puissance du signal en fonction de la distance qui sépare l'émetteur du récepteur. D'autre part, les variations de la puissance à petite échelle ont pour origine la présence d'objets dans l'environnement. Nous examinons dans la suite les différents modèles d'évanouissement : affaiblissement de parcours, *Shadowing*, évanouissement à trajet multiples et l'étalement Doppler. Nous définissons également les différentes zones de communication d'un véhicule.

### 1.4.1 Zones de communication

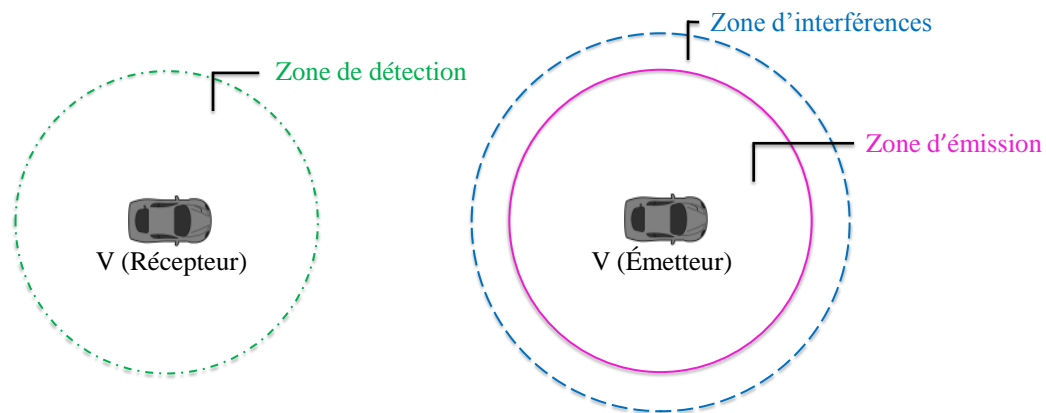


FIGURE 1.5 – Zones d'émission, de détection et d'interférences.

Les signaux propagés s'atténuent au fur et à mesure qu'ils s'éloignent de leur émetteur, un véhicule ne peut pas communiquer avec un autre s'il est situé trop loin de lui. Nous définissons ci-dessous la zone de communication d'un véhicule V. Nous distinguons trois zones (voir figure 1.5) [?] :

- **Zone de détection** : Si V est un récepteur, il est capable de décoder tout signal émis par un véhicule qui se situe dans sa zone de détection. C'est-à-dire la puissance du signal reçu par V est supérieure à sa sensibilité de la réception.
- **Zone d'émission** : Si V est un émetteur, tout véhicule qui se situe dans sa zone d'émission peut décoder correctement son signal émis.
- **Zone d'interférences** : Si V est un émetteur, tous les véhicules situés dans sa zone d'interférence reçoivent son signal émis avec une très faible puissance ne leur permettant de le décoder. Ils ne peuvent décoder le signal. C'est-à-dire tous les véhicules situés dans cette zone subissent des interférences de V. Théoriquement cette zone est illimitée, la

puissance de l'interférence peut être négligée si elle est très inférieure à celle du bruit du canal.

### 1.4.2 Affaiblissement de parcours

L'affaiblissement de parcours décrit la perte de puissance due à la propagation de l'onde électromagnétique dans l'espace. Deux modèles d'affaiblissement de parcours sont communément utilisés dans la littérature :

**Modèle de l'espace libre (*Free-space*)** Le modèle en espace libre *Free-space* représente les conditions idéales de propagation où un seul chemin en visibilité directe existe entre l'émetteur et le récepteur (*Line of Sight* LOS). La formule de Friis [31] décrit la puissance reçue par l'antenne du récepteur située à une distance  $d$  de l'antenne de l'émetteur :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}, \quad (1.1)$$

où  $P_t$  est la puissance du signal transmis,  $G_t$  et  $G_r$  sont, respectivement, les gains des antennes de l'émetteur et du récepteur,  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $L$  ( $L \geq 1$ ) est le facteur de perte du système. L'affaiblissement de parcours *Free-space* est donné par :

$$PL_{Free-space} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right). \quad (1.2)$$

**Modèle de réflexion sur le sol (*Two-ray-ground*)** Ce modèle suppose que le signal reçu est composé de la propagation du signal émis dans l'espace libre LOS et de sa réflexion sur le sol. Contrairement à la formule de Friis, il prend en considération les hauteurs de l'antenne émettrice  $h_t$  et réceptrice  $h_r$ . La puissance reçue est prédite par l'équation suivante :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}. \quad (1.3)$$

L'affaiblissement de parcours de *Two-ray-ground* est exprimé en dB par :

$$PL_{Two-ray-ground} = -10 \log \left( \frac{G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \right). \quad (1.4)$$

Quand la distance  $d$  augmente, l'équation (1.3) montre une perte de puissance plus rapide que l'équation (1.1). Cependant, les prédictions avec *Two-ray-ground* ne sont pas très précises dans les courtes distances, ceci est dû à l'oscillation provoquée par la combinaison constructive et/ou destructive des deux rayons. Par conséquent, le modèle *Free-space* est utilisé si la distance entre

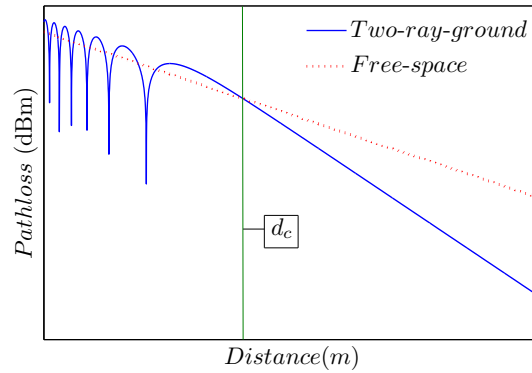


FIGURE 1.6 – *Path-loss : Free-space, Two-ray-ground.*

l'émetteur et le récepteur est inférieure à une distance de référence  $d_c$ <sup>11</sup>, au-delà de cette distance, l'équation (1.3) est utilisée (voir la figure 1.6). A la distance  $d_c$ , l'équation (1.1) et (1.3) doivent être similaires, ce qui implique :

$$d_c = 4\pi \frac{h_t h_r}{\lambda}. \quad (1.5)$$

Théoriquement, un nombre infini de rayons peuvent être réfléchis pour arriver au récepteur. Ce modèle peut être étendu en ajoutant d'autres rayons (par exemple *Ten-ray-ground*).

### 1.4.3 Modèle *Shadowing*

*Free-space* et *Two-ray-ground* sont deux modèles déterministes. Ils représentent la zone de communication comme un cercle idéal mais en réalité, la puissance reçue est une variable aléatoire dépendante des obstacles présents entre l'émetteur et le récepteur. Pour cette raison, un modèle *Shadowing* constitué de deux parties est proposé. La première est connue par le modèle d'affaiblissement de parcours, qui prévoit la puissance moyenne reçue à une distance  $d$ , notée  $\overline{P_r(d)}$ . Elle est calculée par rapport à  $P_r(d_{ref})$  comme suit :

$$\frac{P_r(d_{ref})}{\overline{P_r(d)}} = \left( \frac{d}{d_{ref}} \right)^\alpha, \quad (1.6)$$

où  $\alpha$  est l'exposant d'affaiblissement de parcours déterminé à partir de mesures empiriques et  $P_r(d_{ref})$  est la puissance reçue à une distance de référence  $d_{ref}$ , calculée à partir de l'équation (1.1). Le tableau 1.1 présente quelques valeurs typiques de  $\alpha$  où les valeurs les plus élevées correspondent à une plus forte présence d'obstacles.

11. Cross-over distance.

TABLE 1.1 – Quelques valeurs typiques de l'exposant d'affaiblissement de parcours  $\alpha$ .

Environnement		$\alpha$
Intérieur	Visibilité directe	1,6-1,8
	Obstrué	4-6
Extérieur	Espace libre	2
	Zones urbaines	2,7-5

TABLE 1.2 – Quelques valeurs typiques de la variance du modèle *Shadowing*  $\sigma_{dB}$  (dB).

Environnement	$\sigma_{dB}^2$ (dB)
Extérieur	4-12
Bureau	7
Bureau avec légère séparation	9,6
Usine avec visibilité directe	3-6
Usine obstruée	6,8

Le Path-loss est calculé en dB à partir de l'équation ( 1.7), nous avons :

$$\left[ \frac{\overline{P_r(d)}}{P_r(d_{ref})} \right]_{dB} = -10\alpha \log \left( \frac{d}{d_{ref}} \right), \quad (1.7)$$

La deuxième partie du modèle *Shadowing* décrit la variation de la puissance reçue à une certaine distance. C'est une variable aléatoire log-normale (elle suit la distribution gaussienne si elle est mesurée en dB). La formule générale est :

$$\left[ \frac{\overline{P_r(d)}}{P_r(d_{ref})} \right]_{dB} = -10\alpha \log \left( \frac{d}{d_{ref}} \right) + \chi_{dB}, \quad (1.8)$$

avec  $\chi_{dB}$  une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et de variance  $\sigma_{dB}^2$  déterminée de manière empirique. Le tableau 1.2 représente quelques valeurs typiques de  $\sigma_{dB}^2$ .

#### 1.4.4 Évanouissement par trajets multiples

Le *Multipath-fading* résulte de la réception de plusieurs copies retardées et atténuées du signal ayant emprunté des trajets différents. La puissance du signal reçu peut varier considérablement en espace de quelques mètres, comme montré dans la figure 1.7. Il existe de nombreux modèles qui décrivent ce phénomène de décoloration à petite échelle. Les modèles les plus connus sont l'évanouissement de Rayleigh, Rice et Nakagami-m.

**Rayleigh** La distribution de Rayleigh modélise les évanouissements dus aux multi-trajets, en présence des grands obstacles qui couvrent la visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur

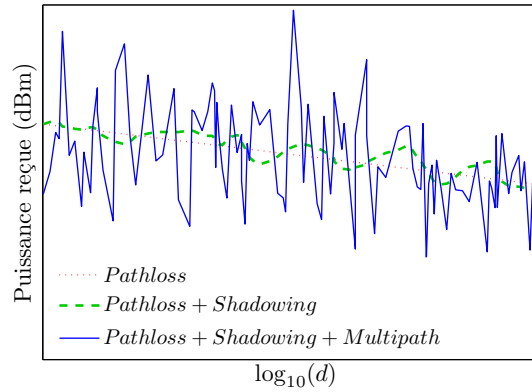


FIGURE 1.7 – Puissance reçue en fonction de la distance : affaiblissement de parcours, *Shadowing*, évanouissement par trajets multiples.

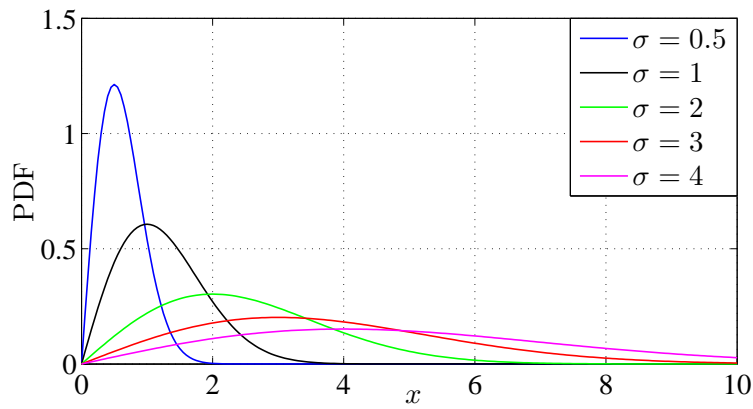


FIGURE 1.8 – Fonction de densité de probabilité d'une distribution Rayleigh.

(*No Line of Sight* NLOS). La densité de probabilité d'une variable  $x$  qui suit la distribution de Rayleigh [32] est donnée par :

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (1.9)$$

où  $\sigma$  est un écart type avec  $\mathbf{E}(x^2) = 2\sigma^2$ . La figure 1.8 montre l'allure de la distribution de Rayleigh pour différentes valeurs de  $\sigma$ .

**Rice** Ce modèle est utilisé pour caractériser un environnement de propagation comprenant un chemin direct entre l'émetteur et le récepteur LOS et une multitude de copies. En présence d'un

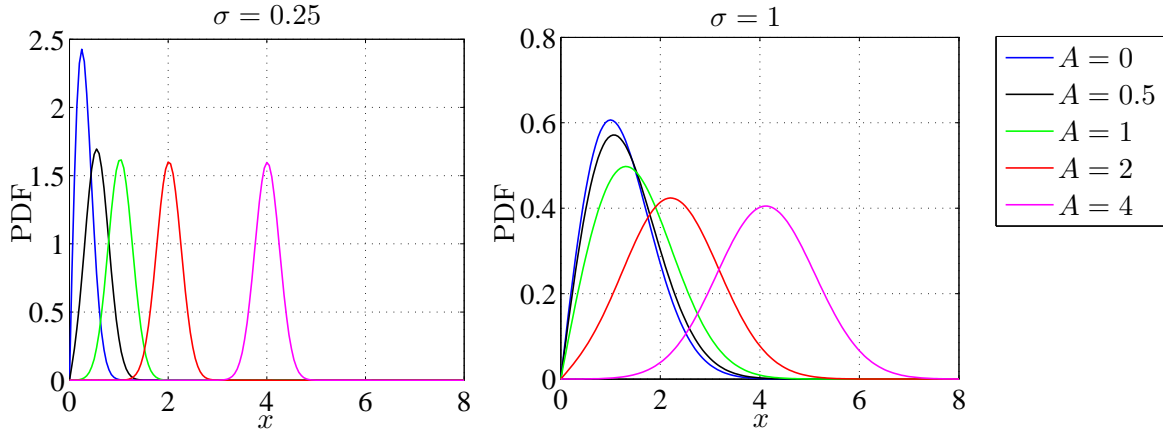


FIGURE 1.9 – Fonction de densité de probabilité d'une distribution Rice.

trajet dominant, l'enveloppe du signal reçu suit la loi de Rice [32] :

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ax}{\sigma^2}\right), & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (1.10)$$

où  $A$  est l'amplitude de signal dominant et  $I_0(\cdot)$  la fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre zéro. La distribution de Rice est généralement décrite par le facteur  $k$  qui correspond au rapport entre la puissance du trajet direct et la puissance moyenne des multi-trajets obéissant à une loi de Rayleigh :

$$k = \frac{A^2}{2\sigma^2}. \quad (1.11)$$

Dans la littérature, le paramètre  $k$  est souvent défini en dB c'est-à-dire  $10 \log_{10}$  de la quantité dans l'équation (1.11). Notons que lorsque  $k_{\text{dB}} = -\infty$  la distribution de Rice devient une distribution de Rayleigh (absence de la composante dominante LOS). À l'inverse, si  $k_{\text{dB}} = 0$  le canal devient sans évanouissement et uniquement avec un bruit blanc additif gaussien (*Additive White Gaussian Noise AWGN*). La figure 1.9 montre l'allure de la distribution de Rice pour différentes valeurs de  $A$  et  $\sigma$ .

**Nakagami** La distribution Nakagami, nommée aussi la distribution- $m$ , est qualifiée comme la meilleure solution pour la distribution des signaux reçus dans les canaux de propagation à trajets multiples dans les zones urbaines *outdoor* [33]. La densité de probabilité de la loi de Nakagami- $m$  (voir la figure 1.10) est donnée par :

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right), & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (1.12)$$



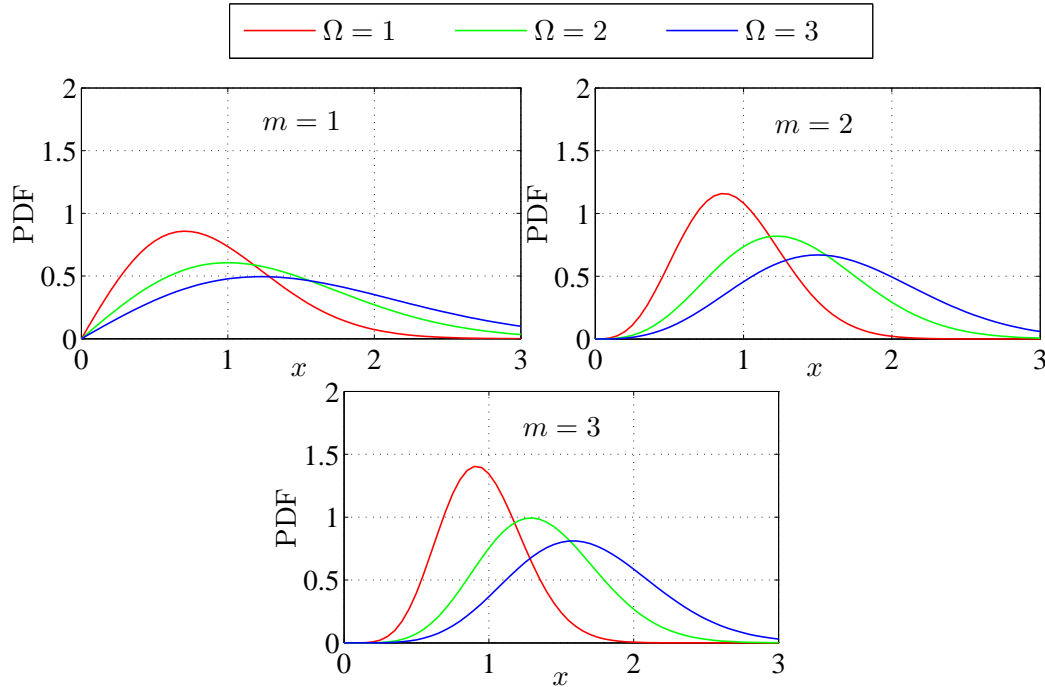


FIGURE 1.10 – Fonction de densité de probabilité de Nakagami pour différentes valeurs de  $m$ .

où  $\Gamma(\cdot)$  est la fonction Gamma,  $m > 0$  est le paramètre d'évanouissement de distribution et  $\Omega > 0$  est la puissance moyenne d'affaiblissement  $\Omega = \mathbf{E}(x^2)$ . Le paramètre  $m \in [\frac{1}{2}, +\infty[$  est donné par :

$$m = \frac{\Omega^2}{\text{Var}(x^2)}, \quad m \geq \frac{1}{2}, \quad (1.13)$$

où  $\text{Var}(x^2)$  est la variance de  $x^2$ . Notons que si  $m = \frac{1}{2}$ , le canal est décrit comme un canal à évanouissement gaussien mono-latéral<sup>12</sup>, si  $m = 1$  le canal suit la distribution de Rayleigh et lorsque  $m \rightarrow +\infty$  le canal est parfaitement sans évanouissement. Si  $m > 1$ , la distribution de Nakagami- $m$  se rapproche étroitement de la distribution de Rice. Le paramètre  $m$  peut être défini en fonction du facteur  $k$  de Rice, comme suit :  $m = \frac{(1+k)^2}{1+2k}$  lorsque  $k \geq 0$ .

Dans un environnement véhiculaire, le choix du paramètre  $m$  dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Dans [34], les auteurs recommandent de paramétrer :

$$\begin{cases} m = 3 & \text{si } d < 50\text{mètres,} \\ m = 1.5 & \text{si } 50\text{mètres} \leq d \leq 150\text{mètres,} \\ m = 1 & \text{si } d > 150\text{mètres.} \end{cases}$$

12. Demi fonction gaussienne

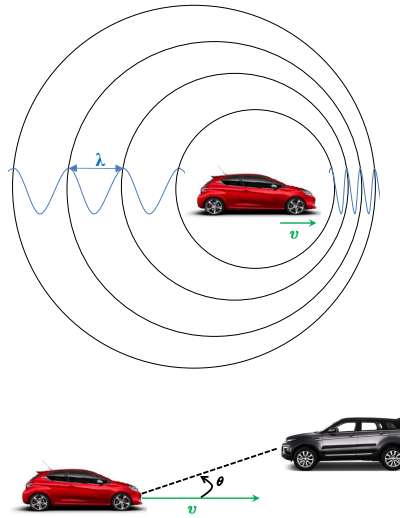


FIGURE 1.11 – Effet Doppler pour une voiture en mouvement.

### 1.4.5 Étalement Doppler

Le déplacement de l'émetteur et/ou du récepteur fait varier la longueur du trajet de propagation et la fréquence du signal reçu au cours du temps. Ce phénomène, appelé l'étalement Doppler [35], est le décalage en fréquence de l'onde reçue, à cause du déplacement relatif de l'émetteur et/ou du récepteur. La différence entre la fréquence émise et celle observée,  $\Delta f$ , est donnée par :

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} \cos \theta, \quad (1.14)$$

où  $v$  est la vitesse relative,  $\lambda$  est la longueur d'onde émise et  $\theta$  est l'angle entre la direction de la source et le trajet direct (LOS). Le décalage Doppler maximal est exprimé par :

$$\Delta f_{max} = \frac{v}{\lambda}. \quad (1.15)$$

Plus la vitesse  $v$  augmente, plus l'étalement Doppler augmente et plus la variation temporelle du canal est rapide. La mesure de la séparation temporelle minimale pour laquelle les réponses impulsionnelles du canal sont considérées décorréélées est définie par le temps de cohérence  $T_c$  du canal. Il est inversement proportionnel au décalage Doppler :

$$T_c \approx \frac{1}{\Delta f}. \quad (1.16)$$

## 1.5 Simulateurs de mobilité dans les réseaux véhiculaires

La fiabilité d'un simulateur véhiculaire repose sur sa capacité à reproduire un environnement, une topologie et des mouvements réels. Les modèles de mobilité utilisés dans la littérature tiennent compte de plusieurs contraintes comme les rues, les routes, les bâtiments, les véhicules, les mouvements de véhicules et les comportements inter-véhicules. Ces contraintes sont divisées en deux groupes qui sont traitées séparément. Le générateur de trafic crée des topologies aléatoires ou à partir de cartes, puis définit le comportement des véhicules dans un environnement particulier. Le modèle de mobilité décrit le cadre des cartes topologiques choisies comme les voies, les routes, les rues, les obstacles à la mobilité, les vitesses de véhicules, la densité de circulation, la distribution véhiculaire sur les routes et le modèle de conduite.

Dans ce paragraphe, nous présentons dans un premier temps quelques générateurs de mobilité utilisés dans la littérature. Dans un second temps, nous comparons les propriétés et les contraintes considérées.

### 1.5.1 Générateurs de mobilité VANETs

Les générateurs de mobilité et les simulateurs de trafic existants possèdent deux aspects : microscopique et macroscopique. Les modèles microscopiques décrivent le comportement de chaque véhicule individuel et les interactions entre véhicules. Les modèles macroscopiques décrivent le trafic routier à l'égard de certaines propriétés qui caractérisent l'environnement routier.

#### SUMO

SUMO (*Simulation of Urban MObility*) [9] est un simulateur de mobilité microscopique gratuit développé par le centre aérospatial allemand DLR [36]. C'est le simulateur le plus utilisé dans les travaux de recherches sur les VANETs. Il se compose de deux éléments principaux : un éditeur de carte routière et un éditeur de mouvement véhiculaire. L'éditeur de carte est utilisé pour créer la topologie de la route. Il propose trois manières différentes pour définir la topologie routière : manuellement par les utilisateurs, automatiquement de façon aléatoire ou à partir d'une carte géographique. Il peut également importer des topologies routières de la base de données TIGER<sup>13</sup> [37] ou GDF [38]. L'éditeur de mouvement permet à l'utilisateur de spécifier les trajets de chaque véhicule. SUMO tient compte des types de véhicules, des feux de signalisation, des intersections tout en respectant le code de la route, la vitesse limite et le changement de voies.

---

13. Une base de données numérique de la carte géographique des États-Unis.

SUMO intègre le modèle de mobilité CFM<sup>14</sup> de Krauss [39], une extension du modèle de mobilité Gipps [40] et le modèle Krajzewicz de changement de voie [41]. Il propose aussi une application graphique qui permet la visualisation à deux dimensions (2D) de la simulation.

## STRAW

STRAW (*Street Random Waypoint*) [42] est développé par le simulateur de réseaux sans fil SWANS (*Scalable Wireless Ad-hoc Network Simulator*). Il utilise des topologies routières extraites de la base de données TIGER en tenant compte des intersections. STRAW propose deux modèles : un premier modèle simple où les véhicules adaptent des mouvements aléatoires à chaque intersection et un deuxième modèle plus complexe où les des véhicules prennent le plus court chemin (CC). Les routes sont bidirectionnelles avec une voie dans chaque direction. Tous les véhicules se déplacent suivant le modèle CFM et ils respectent les panneaux de signalisation, les feux tricolores et les vitesses limites.

## VanetMobiSim

VanetMobiSim (*VANET Mobilty Simulation*) est une extension de CanuMobiSim [43], un cadre flexible pour la modélisation de la mobilité des utilisateurs. Il se concentre sur la mobilité des véhicules et propose de nouveaux modèles réalistes de mouvement de l'automobile aux niveaux macroscopique et microscopique. Au niveau macroscopique, VanetMobiSim peut importer des cartes de la base de données TIGER ou générer de façon aléatoire des topologies routières. Ces modèles tiennent compte de la structure des routes c'est-à-dire les routes à voies multiples, les flux directionnels séparés, les contraintes de vitesse limite et panneaux de signalisation aux intersections. Au niveau microscopique, VanetMobiSim met en œuvre d'autres modèles de mobilité, fournissant une interaction réaliste véhicule à véhicule et véhicule à infrastructure. Selon ces modèles, les véhicules prennent des vitesses suivant le modèle CFM, se dépassent les uns les autres et agissent selon des panneaux de signalisation aux intersections [44].

## MMTS

MMTS (*Multi-agent Microscopic Traffic Model*) [45] simule des mobilités sur la carte géographique de la Suisse pendant les 24 heures de la journée en fonction de l'emploi du temps des individus et de l'environnement choisi. À noter qu'une approche similaire a été suivie dans les laboratoires de recherche de Los Alamos aux Etats-Unis (*Los Alamos Research Labs USA*), mais

---

14. *Car Following Model* : Chaque véhicule se déplace avec une vitesse proche de celle du véhicule qui le précède et peut accélérer jusqu'à atteindre sa vitesse maximale si la route est libre.

en utilisant des statistiques provenant de divers systèmes de gestion du trafic urbain tels que les capteurs de feux de circulation. MMTS ne considère aucun mécanisme de contrôle aux intersections par contre il prend compte du changement de voies suivant la modélisation par automates cellulaires<sup>15</sup>. Les itinéraires sont calculés suivant l’algorithme du plus court chemin CC qui tient compte de la congestion des routes.

## UDel

UDel (*University of Delaware Model*) est un simulateur de mobilité qui se base sur des enquêtes provenant de plusieurs domaines de recherche, y compris des études d’emploi du temps réalisées par le département des statistiques de travail aux Etats-Unis (*US Department of Labor Statistics*) et des communautés de recherche en affaires et des piétons, et aussi des études sur la mobilité du véhicule par la planification urbaine [46]. La circulation des véhicules est dérivée à partir des statistiques de trafic de véhicules recueillies par les gouvernements étatiques et locaux et à partir de l’emploi du temps des utilisateurs de routes. UDel prend en compte plusieurs facteurs comme les heures de pointes, l’heure du déjeuner, les pauses, les courses notamment le week-end, les piétons, la densité des véhicules, et les journées de travail. Chaque simulation de mouvement est basée sur un programme individuel, qui comprend toute sorte d’activité à une journée spécifique. Au niveau macroscopique, le modèle extrait la topologie de la route à partir de données géographiques sur la ville à simuler. Le trajet parcouru (départ-arrivé) est généré en fonction des activités précisées et le véhicule choisit de façon aléatoire les directions à chaque intersection. Au niveau microscopique, la vitesse suit la technique CFM avec possibilité de changement de voies.

## CARISMA

Le simulateur de trafic de CARISMA [47] est un simulateur réaliste contenant des caractéristiques microscopiques et macroscopiques. Il intègre le modèle CFM de Krauss, une gestion des intersections et importe la topologie des routes des cartes géographiques de la norme ESRI<sup>16</sup> [48]. Il se limite par la considération uniquement des panneaux de stop aux intersections et il ne tient pas compte ni des changements de voie ni des directions d’intersection complexes. CARISMA fournit une gestion de voyage en temps réel, ce qui est une caractéristique très intéressante pour l’évaluation de la messagerie V2V mais sa limitation majeure provient des fichiers de norme ESRI payants.

---

15. La route est divisée en petits segments de même taille (cellule). Le temps est discrétisé en unités. Chaque véhicule peut avancer d’une ou plusieurs cellules si elles sont libres.

16. *Environmental Systems Research Institute* ESRI est un logiciel de développement et une société de services fournissant des Systèmes d’Information Géographique (SIG) et des applications de gestion de bases de données géographiques.

## MATLAB

MATLAB (*MATrix LABoratory*) est développé par la société The MathWorks [49]. C'est un logiciel performant en termes de vitesse de calcul. Il est présent dans les systèmes automobiles, le traitement du signal, les appareils de surveillance médicale, les réseaux électriques intelligents et les réseaux mobiles, les communications et bien plus. Récemment, il a aussi été utilisé dans divers travaux de recherche pour simuler un environnement véhiculaire, nous citons comme exemples : [50] et [51]. En effet, MATLAB peut générer un trafic aléatoire avec des vitesses, mouvements et déplacements aléatoires. Les modèles de mobilité CC et CFM sont programmables avec MATLAB. Il constitue un outil idéal pour générer l'environnement véhiculaire au niveau de la couche physique.

### 1.5.2 Comparaison de générateurs de mobilité VANETs

Pour reproduire un environnement véhiculaire et garantir une fiabilité des résultats de simulation, un niveau de réalisme est exigé. Un générateur de mobilité VANET doit générer les caractéristiques uniques des réseaux véhiculaires, citées dans le paragraphe 1.2.3. Le tableau 1.3 compare les caractéristiques environnementales simulées par chaque générateur de mobilité VANET décrit dans le paragraphe 1.5.1. Tandis que le tableau 1.4 compare les contraintes de mouvement supposées [52]. SUMO se distingue par la considération de la majorité des propriétés requises. Il tient compte du contrôle d'intersection comme les feux tricolores et les panneaux de signalisation contrairement à MMTS. Il prend en considération le changement de voie ce qui n'est pas le cas de STRAW et CARISMA. SUMO offre la possibilité aux utilisateurs de choisir une carte géographique particulière pour définir les routes contrairement à UDel qui exige la norme ESRI. VanetMobiSim et SUMO assurent les mêmes propriétés en revanche SUMO est gratuit.

Nous jugeons que SUMO est le mieux adapté pour traiter la problématique étudiée dans cette thèse. Par ailleurs, MATLAB n'est pas connu comme un générateur de mobilité à la base mais il peut reproduire les caractéristiques nécessaires. Il est utilisé dans plusieurs travaux de recherche dans les réseaux VANETs avec le modèle Manhattan<sup>17</sup> [53–57].

## 1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art des réseaux véhiculaires. D'abord, nous avons présenté quelques projets européens et américains dans le domaine de la commu-

---

17. *Manhattan Model* MM : Une grille rectangulaire où des segments horizontaux et verticaux sont positionnés pour définir les voies.

TABLE 1.3 – Comparaison entre générateurs de trafic pour VANETs.

Modèle	Itinéraire	Directions aux intersections	Conduite	Changement de voie	Trajet
SUMO	RWalk CC	Stochastique	CFM	Oui	Aléatoire Activité Attractions
STRAW	RWalk CC	Stochastique Prédéfinie	CFM	Non	Aléatoire
VanetMobiSim	RWalk CC(densité/vitesse)	Stochastique Prédéfinie	CFM	Oui	Aléatoire Activité Attractions
MMTS	CC(congestion)	Prédéfinie	Automates cellulaires	Oui	Activité
UDel	RWalk	Stochastique	CFM	Oui	Activité
CARISMA	CC(densité/vitesse)	Prédéfinie	CFM	Non	Aléatoire

TABLE 1.4 – Comparaison de contraintes de mouvement utilisées par les générateurs VANETs.

Modèle	Topologie de route				Contrôle aux intersections
	Type	Voies multiples	Vitesse limite	Vitesse	
SUMO	Utilisateur Aléatoire TIGER	Oui	Oui	Progressive	Stop Feux de signalisation
STRAW	TIGER	Non	Non	Progressive	Stop Feux de signalisation
VanetMobiSim	Utilisateur Aléatoire TIGER	Oui	Oui	Progressive	Stop Feux de signalisation
MMTS	Suisse	Oui	Oui	Progressive	Non
UDel	ESRI	Oui	Oui	Progressive	Stop
CARISMA	ESRI	Oui	Oui	Progressive	Stop

nication véhiculaire. Ensuite, nous avons présenté les différentes applications, caractéristiques et défis actuels des VANETs. Nous avons également donné un aperçu sur les architectures de standardisation dans les réseaux véhiculaires WAVE, ETSI et CLAM, connues dans la littérature.

Puis, nous avons vu que le signal radiofréquence propagé subit à une multitude de phénomènes : le *path-loss* décrit l'affaiblissement proportionnel à la distance de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Le *shadowing* représente les variations lentes du signal dues aux différentes interactions avec les obstacles dans l'environnement. Les évanouissements par trajets multiples représentent les fluctuations rapides du signal liées aux interférences constructives et destructives entre les signaux des différents trajets. L'étalement Doppler est le décalage en fréquence entre l'onde émise et celle reçue à cause du déplacement relatif de l'émetteur et le récepteur.

Finalement, nous avons montré que pour reproduire un environnement véhiculaire, il est nécessaire qu'un simulateur de mobilité génère plusieurs contraintes de mouvement tels que les panneaux de signalisation, les feux tricolores et les vitesses limites. SUMO est présenté comme étant un modèle réaliste qui intègre plusieurs aspects de mobilité véhiculaire. Bien que MATLAB ne soit pas à la base un simulateur de mobilité, plusieurs scénarios de mobilité sont possibles notamment le déplacement sur la grille de Manhattan.

Dans le chapitre prochain, nous nous intéressons aux problématiques majeures des réseaux VANETS et nous nous focalisons sur une problématique particulière pour laquelle nous donnerons des solutions proposées de la littérature.



# CHAPITRE 2

## Problématiques des réseaux véhiculaires

---

### 2.1 Introduction

En vue de maîtriser les principes des communications sans fil dans le cadre des réseaux véhiculaires ad-hoc, nous nous intéressons aux techniques de transmission et réception entre véhicules au niveau de la couche physique et au fonctionnement de la couche liaison de données. Ce chapitre est composé de deux parties. Dans la première partie, nous présentons les techniques de transmission à antennes multiples ainsi que les différentes méthodes de détection et d'annulation d'interférences. La deuxième partie décrit le protocole MAC IEEE 802.11p [20], y compris les différentes trames utilisées, l'espacement entre trames, le mécanisme du protocole MAC et les méthodes d'acquittement. Ensuite, nous étudions quelques problématiques du protocole MAC, notamment le problème de nœud exposé, le problème de nœud caché et le problème de blocage de réception. Ce dernier fera l'objet des travaux effectués dans cette thèse. Nous nous focalisons en particulier sur ce problème et nous citons des solutions de la littérature. Finalement, nous concluons ce chapitre avec une synthèse des deux couches étudiées.

## 2.2 Couche physique : Transmission et Détection

La couche physique définit la transmission et la réception des données à travers le canal de propagation. Elle assure l'encodage et le décodage de données, la modulation, le raccordement au support physique et les techniques de transmission sur le support physique. Nous nous intéressons particulièrement, dans ce paragraphe, aux techniques de transmission et détection communément utilisées dans les réseaux sans fil ad-hoc.

### 2.2.1 Techniques de transmission à antennes multiples

Nous présentons ci-dessous les systèmes mono-antenne et multi-antennes :

#### Systèmes de communication

Dans une communication sans fil, le nombre d'antennes utilisées distingue différents systèmes de transmission [58] :

**SISO** Les systèmes *Single-Input Single-Output* sont les systèmes les plus simples. Ils possèdent une seule antenne émettrice et une seule antenne réceptrice. Pour un canal non-dispersif, le symbole reçu est de la forme :  $y = hx + n$  où  $h$  est l'évanouissement du canal,  $x$  est le symbole émis et  $n$  est le bruit blanc additif gaussien. La capacité d'un canal SISO est définie par :

$$C = \log_2(1 + \rho|h|^2) \quad (\text{en bits/s/Hz}), \quad (2.1)$$

où  $\rho$  est le rapport-signal-à-bruit.

**MIMO** Les systèmes *Multiple-Input Multiple-Output* disposent de plusieurs antennes émettrices et réceptrices. La figure 2.1 présente un exemple de système MIMO avec  $N_t$  antennes émettrices et  $N_r$  antennes réceptrices ( $N_t \leq N_r$ ). Le modèle de transmission est défini comme suit :

$$y = Hx + n. \quad (2.2)$$

Le canal de transmission est défini par la matrice du canal  $H$  de taille  $N_r \times N_t$  :

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \cdots & h_{N_r,N_t} \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

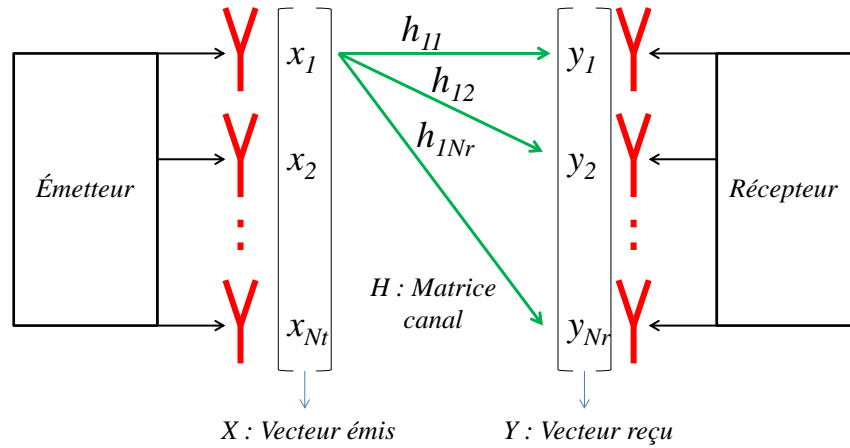


FIGURE 2.1 – Canal MIMO.

où chaque élément  $h_{ij}$  caractérise l'évanouissement entre l'antenne de réception  $i$  et l'antenne d'émission  $j$ .  $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_{N_r}]^T \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$  est le vecteur de symboles reçu,  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{N_t}]^T \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  est le vecteur de symboles émis,  $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_{N_r}]^T \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$  est le vecteur du bruit AWGN. La capacité d'un canal MIMO est donnée par :

$$C = \log_2(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^H) \quad (\text{en bits/s/Hz}), \quad (2.4)$$

où  $I_{N_r}$  est la matrice identité d'ordre  $N_r$ .

Il existe deux cas particuliers des systèmes MIMO : les systèmes SIMO quand  $N_t = 1$  et les systèmes MISO quand  $N_r = 1$ .

**SIMO** Les systèmes *Single-Input Multiple-Output* contiennent une seule antenne émettrice et plusieurs antennes réceptrices. Le vecteur de symboles reçu est donné par :  $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$  où  $\mathbf{H}$  est la matrice canal de taille  $(N_r \times 1)$ ,  $x$  le symbole émis et  $\mathbf{n}$  est le vecteur du bruit AWGN de taille  $(N_r \times 1)$ . Les systèmes SIMO sont souvent utilisés pour lutter contre les évanouissements temporels. Le récepteur évalue de deux manières : soit il ne considère que le signal de réception le plus fort et rejette les signaux plus faibles où il combine tous les signaux pour plus d'efficacité. La capacité d'un canal SIMO est définie par :

$$C = \log_2(1 + \rho \sum_{i=1}^{N_r} \|h_i\|^2) \quad (\text{en bits/s/Hz}). \quad (2.5)$$

**MISO** Les systèmes *Multiple-Output Single-Input* contiennent plusieurs antennes émettrices et une seule antenne réceptrice. Le signal reçu est de la forme  $y = \mathbf{h}\mathbf{x} + n$  où  $y$  est le signal

reçu,  $\mathbf{h}$  est le vecteur canal de taille  $(1 \times N_t)$  et  $n$  est le bruit AWGN. Les différentes antennes transmettent la même information de manière redondante sur plusieurs antennes. Le gain reste toutefois assez limité étant donné que les voies sont considérablement corrélées en raison de la proximité spatiale des antennes. La capacité d'un canal MISO est définie par :

$$C = \log_2\left(1 + \frac{\rho}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \|h_i\|^2\right) \quad (\text{en bits/s/Hz}). \quad (2.6)$$

### Techniques de transmission

Nous distinguons principalement trois techniques d'utilisation des systèmes MIMO :

**Multiplexage spatial** Cette technique augmente le débit en envoyant plusieurs flux de données parallèlement. Du côté émetteur, chaque séquence de données est divisée en plusieurs sous-séquences (autant que le nombre d'antennes émettrices) puis envoyées sur plusieurs antennes. Du côté récepteur, les sous-séquences reçues sont détectées puis ordonnées pour trouver les signaux émis [59].

**Diversité spatiale** La technique de diversité spatiale est utilisée quand le rapport signal à bruit SNR est faible. L'émetteur envoie plusieurs copies du signal à transmettre sur toutes les antennes. Le récepteur de son côté combine les signaux pour récupérer un signal moins atténué que les signaux reçus par chaque antenne [59].

**Beamforming** Cette technique a été proposée pour la première fois en 1990 pour la technologie radar et ensuite généralisée pour divers systèmes de communications ad-hoc [60]. L'idée de base est d'utiliser des réseaux d'antennes pour transmettre et recevoir des signaux de/vers une direction précise, afin d'améliorer le SNR reçu. Cette méthode est généralement utilisée quand le SNR est relativement faible, quand l'exigence de fiabilité de données est élevée ou pour limiter les interférences.

### 2.2.2 Techniques de détection à antennes multiples

Dans les systèmes MIMO, il existe plusieurs méthodes de détection de symboles. Le choix repose sur deux critères ; la complexité et l'estimation optimale.

**Détection ZF (*Zero Forcing*)** La détection par forçage à zéro est simple à mettre en œuvre. Elle utilise l'inverse de la matrice canal  $\mathbf{H}$  pour annuler toutes les contributions des émetteurs sur chaque symbole. Quand la matrice n'est pas inversible, le pseudo-inverse est utilisé. Le vecteur  $\mathbf{x}$  est estimé comme suit [32] :

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{cases} \mathbf{H}^{-1}\mathbf{y} & \text{si } \mathbf{H} \text{ est carrée,} \\ (\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^H\mathbf{y} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.7)$$

où  $\mathbf{H}^H$  est le transposé du conjugué de la matrice  $\mathbf{H}$ . Cette technique est sensible au bruit ; lorsque ce dernier est élevé un autre détecteur linéaire est recommandé.

**Détection MMSE (*Minimum Mean Square Error*)** Cette technique minimise l'erreur quadratique moyenne  $\mathbb{E} \|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|^2$  due au bruit et aux interférences entre symboles. Contrairement au ZF, la MMSE prend en compte le SNR pour estimer les symboles émis. Les symboles sont estimés de la manière suivante [32] :

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \frac{N_t}{\rho}\mathbf{I}_{N_t})^{-1}\mathbf{H}^H\mathbf{y}. \quad (2.8)$$

où  $\mathbf{I}_{N_t}$  est une matrice identité d'ordre  $N_t$ . Lorsque le SNR est très élevé,  $\frac{N_t}{\rho} \rightarrow 0$  et ainsi les détecteurs ZF et MMSE deviennent équivalents

**Détection ML (*Maximum Likelihood*)** Le détecteur ML choisit le vecteur symbole  $\hat{\mathbf{x}}$  qui minimise la distance avec le signal reçu  $\mathbf{y}$  :

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2. \quad (2.9)$$

Cette technique est optimale mais demande des calculs complexes quand le nombre d'antennes est grand. Plusieurs solutions sous-optimales ont été proposées pour réduire la charge de calcul et avoir des performances semblables à ML [61].

**Détecteur V-BLAST (*Vertical-Bel Laboratories Layered Space-Time*)** Cette technique est adaptée à la structure des systèmes MIMO employant le multiplexage spatial. Elle utilise un algorithme d'annulations successives d'interférences (*Successive Interference Cancellation* SIC). Ce dernier consiste à soustraire les interférences de la valeur du symbole reçu pour détecter le symbole émis. A chaque étape, la contribution des éléments de symbole déjà estimés est retranchée du vecteur reçu. L'algorithme d'annulations d'interférences peut utiliser soit le détecteur ZF, soit le détecteur MMSE. La propagation d'erreurs est le point faible de cette technique. Si l'estimation est erronée alors sa contribution l'est aussi. Néanmoins, l'annulation

d'interférences peut se faire dans un ordre précisé (*Ordered Successive Interference Cancellation* OSIC) pour réduire la propagation d'erreurs. Le symbole reçu ayant le SNR le plus fort est estimé en premier.

## 2.3 Couche liaison de données : Protocoles et Problématiques

La couche de liaison de données (*Data link layer*) est essentiellement composée de deux sous-couches : la sous-couche MAC (*Medium Access Control*) définit le protocole d'accès au support. La sous-couche LLC (*Logical Link Control*) s'occupe du contrôle de flux, de la structure et des acquittements des trames. Nous décrivons, dans la suite de ce paragraphe, le protocole MAC du standard IEEE 802.11p dédié aux VANETs. Ensuite, nous abordons quelques problématiques du protocole MAC. Nous accorderons une attention particulière à la problématique qui fera l'objet de cette thèse en citant quelques solutions de la littérature.

### 2.3.1 Protocole MAC IEEE 802.11p

Le protocole MAC IEEE 802.11p gère l'accès au support entre les nœuds qui désirent communiquer, avec deux méthodes d'accès. La première méthode DCF (*Distributed Coordination Function*) est conçue pour les réseaux ad-hoc. La deuxième méthode PCF (*Point Coordination Function*) est utilisée dans les réseaux sans fil centralisés dont l'infrastructure est reliée à une station centrale ou à un point d'accès.

#### Les différentes Trames MAC

Le protocole IEEE 802.11p avec la technique d'accès CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) utilise trois types de trames : les trames de contrôle (RTS, CTS et ACK), les trames de données DATA et les trames de gestion<sup>1</sup> (voir la figure 2.2).

- **RTS** : *Request-To-Send* est une trame de 20 octets. Elle est utilisée pour demander une transmission de données. Elle indique l'adresse du récepteur (RA, *Receiver Address*), l'adresse de l'émetteur (TA, *Transmit Address*), la durée totale de l'échange en  $\mu s$  (DATA et CTS) et contient un champ de contrôle FCS (*Frame Check Sequence*).
- **CTS** : *Clear-To-Send* est une trame très courte de 14 octets. Elle est utilisée pour accepter de recevoir des données. Elle contient l'adresse du récepteur, la durée de transmission

---

1. Ces trames sont utilisées pour la gestion de l'association et l'authentification entre les nœuds et le point d'accès.

annoncée par le RTS diminuée de la durée d'émission du CTS et du SIFS<sup>2</sup> et un champ FCS.

- **DATA** : La trame de données comporte trois parties, une en-tête MAC de 30 octets, un champ de données variant de 0 à 2312 octets et un champ de contrôle FCS. L'émission de la trame débute par un préambule de synchronisation de 12 à 18 octets, suivi d'une en-tête ajoutée par la couche convergence (PLCP, *Physical Layer Convergence Protocol*).
- **ACK** : La trame *ACKnowledgement* est utilisée pour acquitter la réception d'une trame de donnée. Elle est de la même forme que la trame CTS, le champ adresse du récepteur indique l'adresse de l'émetteur du RTS.

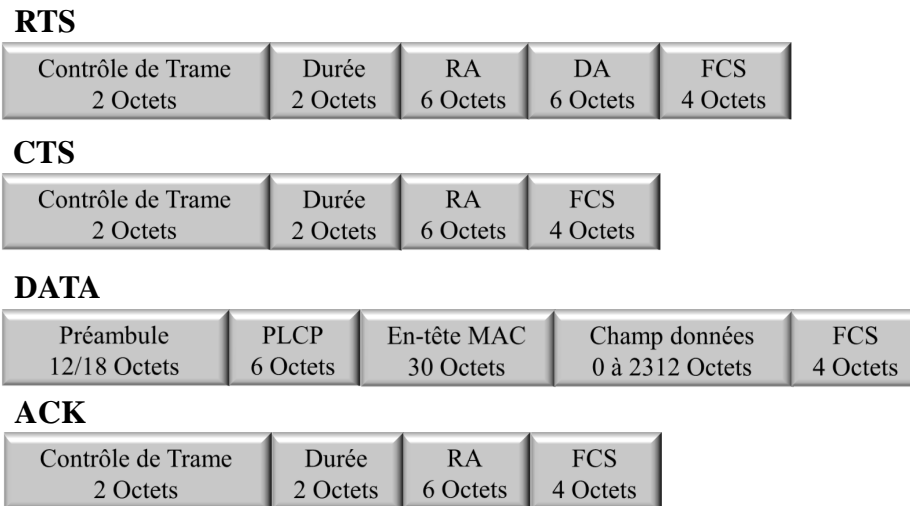


FIGURE 2.2 – Les trames IEEE 802.11p.

### E spacements entre trames

Les transmissions des trames de contrôle et de données sont espacées par des périodes d'inactivité sur le canal (*Inter-Frame Space IFS*) :

- SIFS : *Short Inter-Frame Space* est l'espace le plus court. Il sépare chaque trame émise de la suivante dans une même communication. C'est l'espace entre le dernier symbole émis et le premier symbole reçu d'une trame.
- PIFS : *PCF Inter-Frame Space* est le temps d'attente exigé avant d'émettre un paquet en mode PCF. Il est aussi utilisé pour émettre des données qui disposent d'un accès prioritaire.
- DIFS : *DCF Inter-Frame Space* est le temps minimal d'attente avant d'émettre un paquet en mode DCF.
- EIFS : *Extended Inter-Frame Space* est le plus long des IFS. Il est utilisé pour toute

2. SIFS : *Short Inter-Frame Space* est un espace entre trames (voir le paragraphe 2.3.1.)

réception incorrecte. Si l'émetteur ne reçoit pas l'acquittement d'une trame émise pendant une période EIFS, il déduit que la trame n'a pas été reçue et il la retransmet.

Chaque IFS correspond à la valeur de son précédent augmenté d'un *Time Slot* tel que défini dans la figure 2.3 (SIFS < PIFS < DIFS < EIFS).

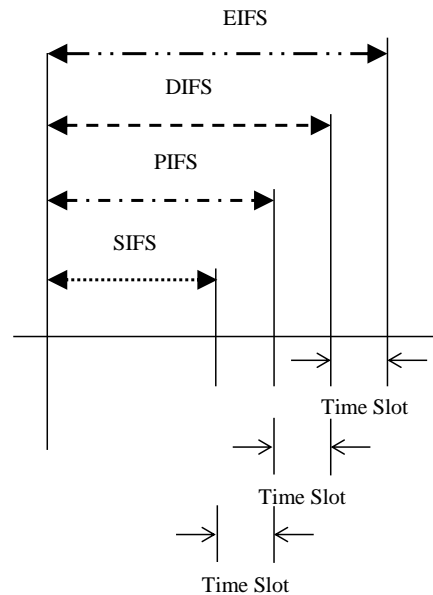


FIGURE 2.3 – Les différents espacements IFS.

### Mécanisme du protocole

L'accès au canal début par un échange réciproque (de RTS et CTS) entre l'émetteur et le récepteur avant d'initier des données. D'abord, T écoute le canal pendant une période fixe et prédéfinie DIFS. Si le canal est libre, il envoie un RTS à R. Ce dernier, après avoir attendu une période SIFS, répond par CTS pour accepter la communication. En écoutant le canal, tous les voisins de T et de R (c'est-à-dire les nœuds dans la zone d'émission de T et les nœuds dans la zone de détection de R) reçoivent un RTS et/ou un CTS. Ils configurent ainsi leur vecteur d'allocation de réseau NAV (*Network Allocation Vector*) avec la durée de communication annoncée dans le RTS ou le CTS reçu (NAV(RTS) ou NAV(CTS)) et ils s'interdisent toute transmission jusqu'à ce que le canal se libère. À l'échéance de cette durée, tous les nœuds sont libres et peuvent retenter l'accès au canal. Le mécanisme de CSMA/CA est décrit dans la figure 2.4, entre un émetteur T et un récepteur R.



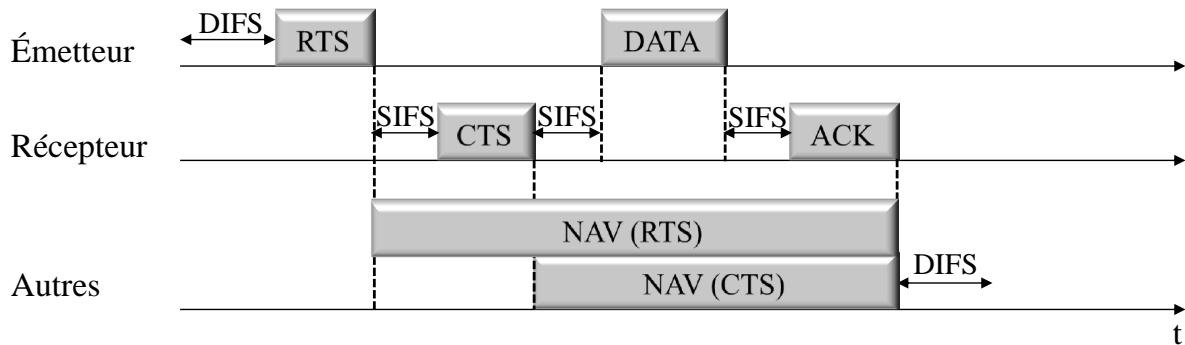
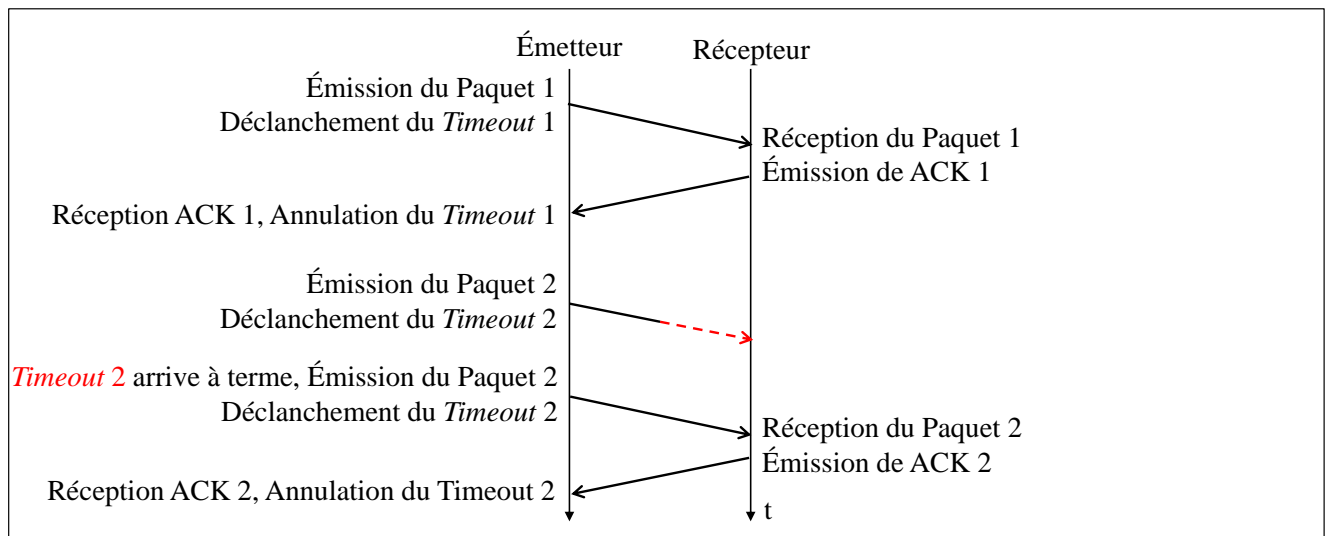


FIGURE 2.4 – Le protocole MAC IEEE 802.11p.

FIGURE 2.5 – Déroulement du protocole *Stop-and-Wait* dans le cas où le paquet 2 est perdu.

### Protocoles de retransmission

Si un paquet de données est perdu, le récepteur doit informer l'émetteur pour qu'il le lui retransmette. Pour-cela, les nœuds peuvent utiliser différents mécanismes de retransmission :

- **Stop-and-Wait SW** : L'émetteur envoie un seul paquet de données, déclenche un temporisateur *Timeout* et attend un acquittement de la part du récepteur [62]. Ce dernier envoie un ACK si le paquet est reçu correctement. Dans le cas contraire, il rejette le paquet et n'envoie pas d'acquittement. À l'échéance du *Timeout*, si l'émetteur ne reçoit pas l'acquittement attendu il estime que le paquet est perdu et il le réemet. La figure 2.5 décrit le fonctionnement du protocole dans le cas où le paquet 2 est perdu.
- **Go-Back-N GBN** : L'émetteur envoie successivement un nombre prédéfini de paquets,



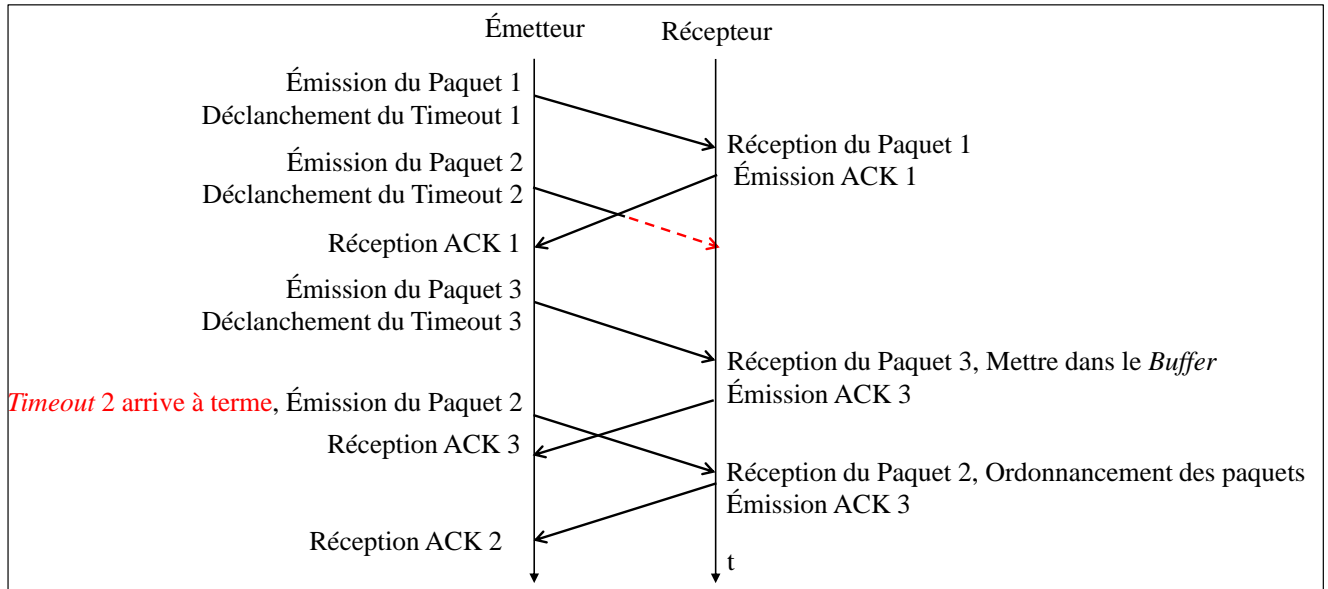


FIGURE 2.7 – Déroulement du protocole Selective-Repeat dans le cas où le paquet 2 est perdu.

tampon (*Buffer*). Lorsque le *Timeout* du paquet perdu s'écoule et l'émetteur ne reçoit pas le ACK correspondant, il déduit que le paquet n'a pas été reçu et il le retransmet. Quand le récepteur reçoit le paquet manquant, il envoie un ACK à l'émetteur et réordonne les paquets du *Buffer*. La figure 2.7 décrit le déroulement du protocole, dans le cas où le paquet 2 a été perdu [63].

### 2.3.2 Problématiques du protocole MAC

D'une manière générale, le protocole MAC doit gérer l'accès des nœuds et assurer le partage du canal. De plus, il doit résoudre divers problèmes tels que le problème du nœud caché, le problème du nœud exposé et le problème de blocage de réception. Nous présentons, dans la suite, les solutions proposées par le protocole MAC IEEE 802.11p et les limites de ces solutions.

#### Problème du nœud exposé

Le problème de nœud exposé se produit lorsqu'un nœud est empêché par le protocole MAC d'émettre des données à cause d'un émetteur voisin. Considérons le cas présenté dans la figure 2.8 où  $T_1$  émet des données à  $R_1$ .  $T_2$  se situe à l'intérieur de la zone d'émission de  $T_1$ . Lorsque  $T_2$  écoute le canal radio, il entend une communication en cours et il déduit qu'il ne peut entamer une communication avec  $R_2$  alors qu'il aurait pu. En effet,  $R_1$  et  $R_2$  sont respectivement en dehors de

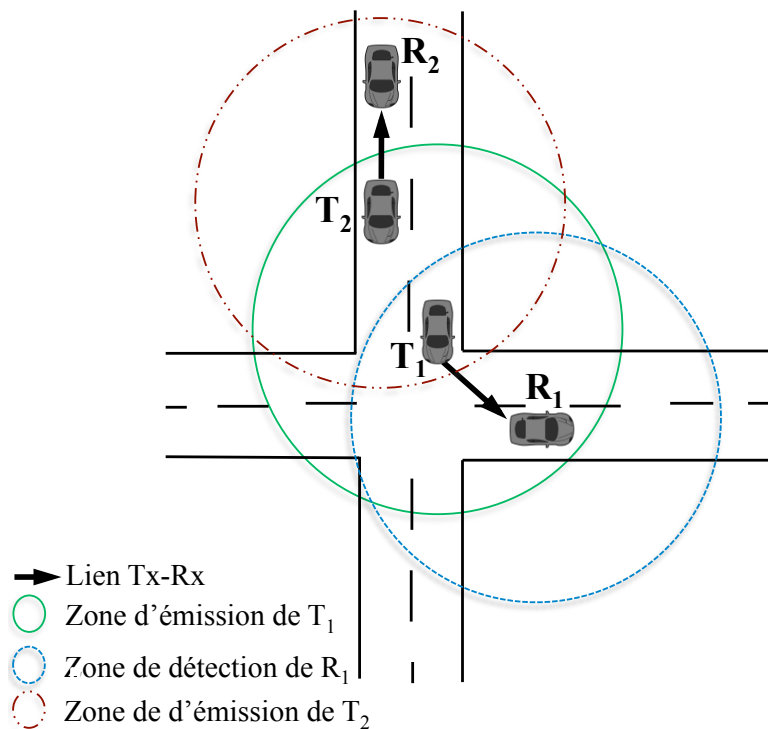


FIGURE 2.8 – Scénario 1 : Véhicule exposé.

la zone d'émission de  $T_2$  et  $T_1$ , ils peuvent donc recevoir des données sans aucune interférence.

Le protocole CSMA/CA avec RTS-CTS permet de résoudre ce problème. Dans le cas de la figure 2.8, lorsque  $T_2$  reçoit le RTS de  $T_1$ , mais pas le CTS correspondant,  $T_2$  peut en déduire qu'il est un nœud exposé et procède à sa transmission de données. Mais si les nœuds ne sont pas synchronisés, si les tailles de paquets ou les débits de données sont différents, le problème reste présent [64, 65].

### Problème du nœud caché

Supposons le scénario présenté à la figure 2.9, où  $T_1$  et  $T_2$  veulent tous les deux communiquer avec  $R$ .  $T_1$  n'est pas dans la zone d'émission de  $T_2$  et vice versa. Les deux véhicules ne se voient pas mutuellement. Lorsque  $T_1$  émet des données à  $R$ ,  $T_2$  ne l'entend pas. Ainsi,  $T_2$  considère que le support est libre (ce qui n'est pas le cas) et émet de même des données à  $R$ . La transmission simultanée de  $T_1$  et  $T_2$  engendre une collision.

Le protocole CSMA/CA utilise les paquets RTS et CTS pour réduire l'effet des nœuds cachés. En effet, quand  $R$  répond  $T_1$  par un CTS,  $T_2$  l'entend et déduit que  $R$  est occupé. Mais si  $T_2$  n'est pas dans la zone d'émission de  $R$  tout en étant dans sa zone de réception, il ne reçoit le

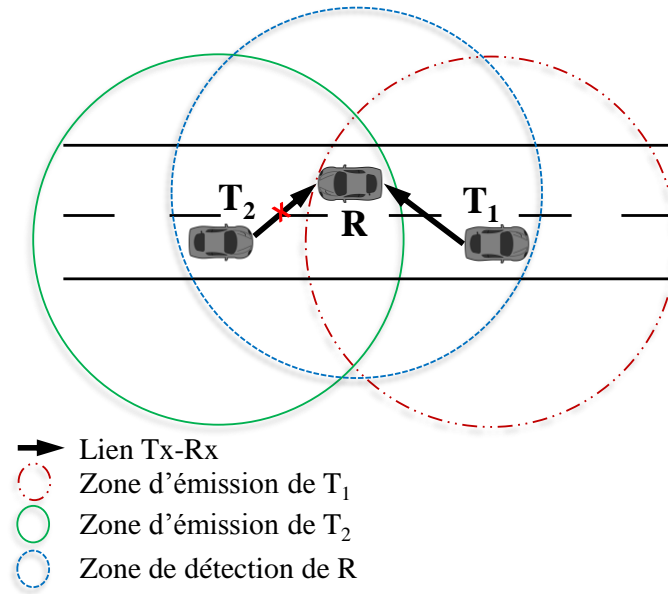


FIGURE 2.9 – Scénario 2 : Véhicule caché.

CTS de R à  $T_1$  et le risque d'une collision reste présent [64, 65].

### Limitation du vecteur NAV

Le vecteur NAV indique à chaque nœud le temps de communication prévu par les nœuds qui occupent le canal. Pendant ce temps, les transmissions simultanées sont interdites pour éviter les collisions. Néanmoins, le vecteur NAV présente quelques limites. Par exemple, la configuration du vecteur NAV peut être redondante. En effet, quand un nœud est à la fois dans la zone d'émission et la zone de détection d'une communication en cours, il configure une première fois son vecteur NAV avec RTS puis une deuxième fois avec CTS. Cette configuration est redondante et non nécessaire. De plus, il est possible que deux trames de contrôles RTS rentrent en collision si elles sont émises au même moment. Aucun de leurs expéditeurs n'aurait le temps de configurer le vecteur NAV.

### Problème de blocage de réception

Un récepteur est dit bloqué s'il ne peut pas recevoir un RTS à cause d'une transmission dans sa zone de détection. Prenons le scénario décrit dans la figure 2.10 où  $T_2$  transmet des données à  $R_2$  et  $R_1$  est dans la zone de transmission de  $T_2$ . Quand  $T_1$  envoie un RTS à  $R_1$ , il ne reçoit pas le CTS prévu de  $R_1$  à cause des transmissions de  $T_2$ .  $T_1$  retente en vain la transmission de RTS

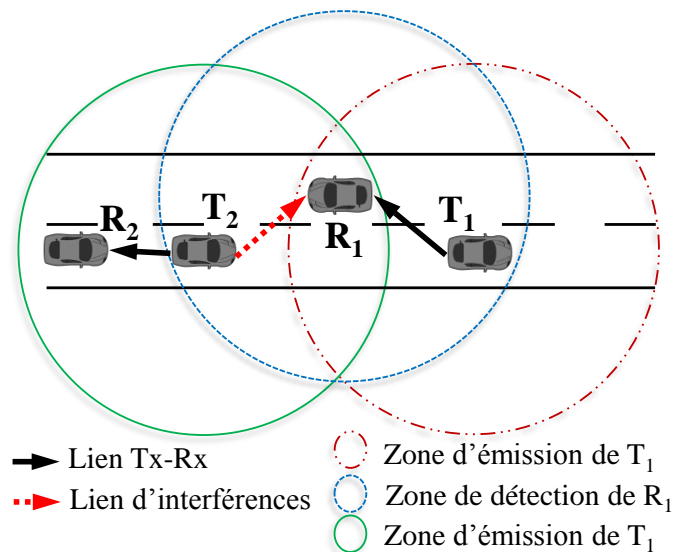


FIGURE 2.10 – Scénario 3 : Véhicule bloqué.

et pendant ce moment  $T_2$  continue seul à transmettre ses données et  $R_1$  reste bloqué [66].

Le blocage de réception conduit alors à des retransmissions inutiles de RTS. En plus, la communication entre  $T_1$  et  $R_1$  est reportée jusqu'à ce que  $T_2$  finisse d'émettre ses données. Ceci entraîne une dégradation du débit utile global du réseau. Dans le cas d'une application de confort VANET, par exemple les jeux en ligne, les utilisateurs ont tendance à occuper longtemps le canal. Le problème de blocage empêche le partage optimal du canal. De plus, dans un cas d'une application de sécurité, il est primordial que l'information arrive à temps. Le blocage de réception retarde la réception de données.

### 2.3.3 Solutions dans la littérature pour le problème de blocage de réception

Nous nous intéressons dans cette thèse à résoudre le problème de blocage de réception dans les réseaux véhiculaires. Dans ce paragraphe, nous présentons quelques solutions existantes pour réduire l'effet de blocage de réception dans les réseaux ad-hoc en général.

#### Solution 1 : Protocole DUCHA

DUCHA (*Dual-Channel*) [67] est un protocole MAC qui utilise une tonalité d'occupation *out-of-band* et deux canaux de communication ; un pour les paquets de contrôle et un autre pour les paquets de données. Les paquets de contrôle sont transmis séparément pour éviter d'éventuelles

collisions avec les paquets de données. La figure 2.11 décrit le diagramme de séquence de ce protocole. Pour un couple émetteur-récepteur, le protocole procède comme suit : d'abord, l'émetteur transmet un RTS au récepteur. Si le canal de données est libre, le récepteur répond par un CTS, indépendamment de l'état du canal de contrôle. Si les deux canaux sont occupés, il ignore la réception de ce dernier. Sinon, si le canal de contrôle est libre et le canal de données est occupé, il répond par un NCTS (Negative CTS) sur le canal de contrôle. Ce paquet fournit une estimation du temps de transmission restant sur le canal de données. Quand l'émetteur le reçoit, il ajourne sa transmission de données et retente l'accès au canal après cette période. Une fois l'échange RTS-CTS entre l'émetteur et le récepteur est effectué, l'émetteur commence sa transmission de données. Au même temps, un signal de tonalité d'occupation continue NACK se déclenche. Il servira à signaler la non-réception d'un paquet de données. En effet, chaque récepteur a une minuterie pour ne pas dépasser le temps de transmission maximal d'un paquet de données. Cette durée est préalablement définie dans le paquet RTS. Si le délai expire et le récepteur n'a pas reçu correctement le paquet de données, il suppose alors que la transmission a échoué et il continue l'émission de la tonalité d'occupation pendant une durée *ACK Period*. L'émetteur conclura que sa transmission est interrompue et il procédera à une retransmission. Dans le cas où le paquet est correctement reçu, il arrête la tonalité d'occupation. Ainsi, l'émetteur saura que sa transmission de données est réussie. Aucun paquet ACK n'est nécessaire ici, le protocole garanti qu'il n'y aura aucune de collision entre les paquets de données.

L'allocation d'un canal pour les paquets de contrôle permet au récepteur de recevoir le paquet RTS même lorsqu'il est dans une zone de transmission en cours. Le paquet NCTS permet à l'émetteur d'estimer le temps d'attente avant de tenter l'accès de nouveau. Ceci permettra de réduire considérablement l'effet de blocage du récepteur. Cette solution résout aussi d'autres problèmes dans les réseaux ad-hoc à multi-sauts tels que le problème du terminal caché et le problème du terminal exposé [68]. Le protocole DUCHA fournit une couche de liaison plus stable, améliore la réutilisation spatiale et réduit les collisions de paquets. Une amélioration du débit allant jusqu'à 20% pour les communications à un seul-saut et jusqu'à 500% pour les communications à multi-sauts dans un réseau dense est constatée. Néanmoins, cette solution n'est pas toujours considérée réalisable en raison de la limitation matérielle et de son coût.

### **Solution 2 : Protocole MAC pour antennes directionnelles**

Ce protocole est proposé pour des nœuds équipés d'antennes directionnelles [69]. Chaque nœud utilise un mécanisme appelé *neighbor-discovery mechanism* pour déterminer le faisceau avec lequel il peut atteindre un récepteur donné. Ce mécanisme utilise les informations liées aux paquets de contrôle et les données reçues pour déduire la direction du nœud destinataire de la

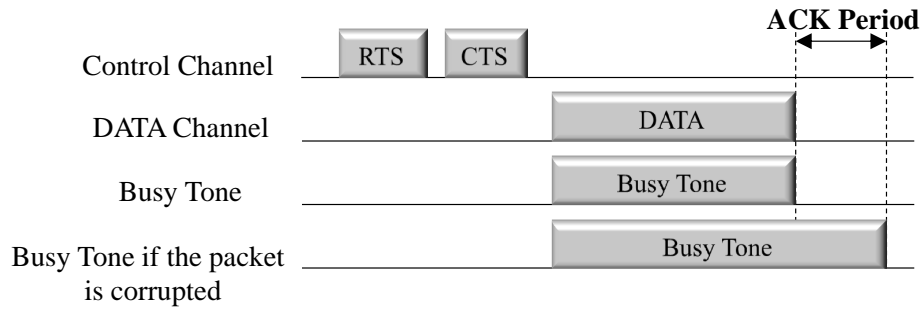


FIGURE 2.11 – Le protocole DUCHA.

manière suivante : d’abord, l’émetteur envoie à travers le canal de contrôle un RTS au récepteur et il attend soit un CTS ou le *Timeout*. Si ce dernier se déclenche, le canal de contrôle et tous les canaux de données demandés dans RTS sont libérés. Si un CTS est reçu, le canal de contrôle et tous les canaux de données à l’exception du canal sélectionné par le récepteur sont libérés. L’émetteur initie ensuite le paquet de données sur le canal. Il attend un ACK ou NACK<sup>3</sup> du récepteur, ou le *timeout* puis il libère le canal de sélectionné.

### Solution 3 : Cross-layer PHY/MAC

Pour résoudre le problème de blocage, un *cross-layer* PHY/MAC combinant un algorithme de sélection d’antennes émettrices et un nouveau protocole MAC a été proposé dans [8, 70]. Cette solution permet à plusieurs émetteurs dans la même zone radio d’émettre simultanément des données sans craindre les interférences et les collisions. En effet, chaque récepteur est amené à chercher la meilleure combinaison d’antennes émettrices en termes de débit utile et ce en utilisant le protocole GBN ou SR. Le choix est soumis à une condition qui lui permettra par la suite de détecter toutes les données émises simultanément dans sa zone de détection. Cette condition limite le nombre d’antennes émettrices dans sa zone de détection au nombre de ses antennes réceptrices. Pour que cette condition soit respectée par tous les nœuds, les choix d’antennes doivent toutefois être partagés et négociés entre voisins. Le protocole MAC permet d’échanger cette information dans le réseau en faisant appel à des nouveaux paquets de contrôles autres que RTS et CTS. Il s’applique en trois phases ; la première phase pour choisir et échanger successivement la liste des meilleures combinaisons d’antennes d’émission (de 1 à  $N_r$  antennes) ; la deuxième phase pour négocier le nombre de données et échanger les listes retenues d’antennes sélectionnées et la dernière pour transmettre simultanément les données. Cette solution permet la transmission simultanée des données, améliore ainsi le débit utile et réduit le phénomène

3. NACK : *Negative ACKnowledgement*



de blocage de réception dans le réseau. Cependant, elle n'est pas adaptée à un environnement véhiculaire.

## 2.4 Conclusion

Nous avons présenté une vue d'ensemble sur les techniques de détection (ZF, MMSE, ML, V-BLAST) : la détection ZF est simple mais sensible au bruit, la détection MMSE est coûteuse en temps de calcul et la détection ML est optimale mais complexe. Le point faible de la détection V-BLAST est la propagation des erreurs. Le mécanisme CSMA/CA ne règle pas définitivement le problème des nœuds cachés ni des nœuds exposés. Son but principal est de régulariser l'accès au médium d'une manière distribuée, tout en essayant d'éviter les collisions. Nous avons vu qu'un protocole MAC doit résoudre les problèmes du nœud caché, du nœud exposé et de blocage de réception. En effet, il doit garantir que les nœuds exposés peuvent émettre leurs données même quand ils sont dans une zone d'émission utilisée. Il doit également empêcher les nœuds cachés d'initier des émissions tout en leur permettant de recevoir des données. Le problème de blocage de réception mérite aussi d'être examiné avec attention. Cependant, la plupart des protocoles MAC proposés dans la littérature pour résoudre ce problème (par exemple DUCHA) permettent la communication d'un seul émetteur dans la zone de détection d'un récepteur et d'un seul récepteur dans la zone d'émission d'un émetteur. Afin d'optimiser la réutilisation spatiale et la capacité de réseau, il est nécessaire que le protocole MAC permette à plusieurs émetteurs et récepteurs de communiquer au même temps dans une même zone radio. Le *cross-layer* présenté au paragraphe 2.3.3 permet les transmissions simultanées des données dans la même zone radio. Néanmoins, cette solution n'est pas adaptée à un réseau VANET.

Dans le chapitre 3, nous adaptons cette solution à un environnement véhiculaire. Nous prenons en considération : i) l'évolution temporelle du canal de transmission ; ii) la durée d'échange de paquets de contrôle ; iii) l'atténuation du canal de transmission ; iv) l'environnement véhiculaire (par exemple le sens de mouvement et la densité). La solution proposée permettra à plusieurs véhicules de communiquer simultanément sans interférer les uns avec les autres.



# CHAPITRE 3

## Architecture cross-layer basée sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices

---

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au problème de blocage de réception dans les réseaux VANETs. Pour réduire son effet néfaste sur le débit utile normalisé DUN du réseau, nous proposons une architecture *cross-layer* PHY/ MAC basée sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices conjointement avec un nouveau protocole MAC. Ce *cross-layer* permet au récepteur de choisir la meilleure combinaison d'antennes émettrices pour améliorer le débit utile normalisé de chaque lien V2V. L'algorithme est présenté avec une méthode de détection multi-utilisateurs qui permettra à plusieurs véhicules d'émettre simultanément des données sans craindre les interférences. Le nouveau protocole MAC gère les paquets de contrôle entre les véhicules communicants.

La suite de chapitre est organisée comme suit : le paragraphe suivant présente l'algorithme de sélection d'antennes ainsi que la méthode de détection multi-utilisateurs. Le troisième paragraphe est consacré à la description détaillée des différentes phases du nouveau protocole MAC. Ensuite, dans le quatrième paragraphe, nous étudions les performances du système proposé en trois scénarios VANET différents. Enfin, nous concluons ce chapitre et nous proposons une optimisation de la solution proposée.

## 3.2 Cross-layer avec sélection d'antennes

Dans ce paragraphe, nous proposons une architecture *cross-layer* PHY/MAC basée sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices dont le but est de veiller à ce que le débit utile normalisé du réseau soit le plus élevé possible. Nous présentons d'abord l'algorithme de sélection d'antennes pour améliorer le débit utile normalisé de chaque lien V2V. Ensuite, nous décrivons la méthode de détection multi-utilisateurs pour émettre des données simultanément dans une même zone de radio et ainsi améliorer le débit utile normalisé du réseau.

### 3.2.1 Algorithme de sélection d'antennes émettrices

Nous considérons un lien point à point MIMO avec  $N_t$  antennes émettrices et  $N_r$  antennes réceptrices où  $N_r \geq N_t$ . Les communications entre deux nœuds se font via un canal variable dans le temps supposé stationnaire par morceaux. Ainsi, le symbole MIMO reçu à l'indice temporel  $\ell$  est comme suit :

$$\mathbf{y}[\ell] = \mathbf{H}[\ell]\mathbf{x}[\ell] + \mathbf{n}[\ell], \quad (3.1)$$

où  $\mathbf{y}[\ell] = [y_1(\ell), y_2(\ell), \dots, y_{N_r}(\ell)]^T \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$  est le vecteur de symbole reçu,  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$  est la matrice canal,  $\mathbf{x}[\ell] = [x_1(\ell), x_2(\ell), \dots, x_{N_t}(\ell)]^T \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  est le vecteur de symbole émis de puissance  $P_t = E[\mathbf{x}^H[\ell]\mathbf{x}[\ell]]$  et  $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 I_{N_r})$  est un bruit blanc additif gaussien de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ , où  $I_{N_r}$  est une matrice identité d'ordre  $N_r$ . Par soucis de simplicité d'écriture, nous supprimons l'indice temporel  $\ell$  dans les équations ultérieures.

Nous supposons que le récepteur connaît parfaitement le canal (ce qui peut être fait par une technique d'estimation de canal) et qu'il emploie la technique de détection ZF-BLAST avec annulations successives ordonnées d'interférences OSIC. Le canal MIMO défini par la matrice  $\mathbf{H}$  peut être décomposé en plusieurs canaux SISO parallèles, en utilisant la décomposition-QR comme suit :

$$\mathbf{H} = \mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{\Pi}, \quad (3.2)$$

où  $\mathbf{Q} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$  est une matrice unitaire,  $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$  est une matrice triangulaire supérieure,  $\mathbf{\Pi} \in \{0, 1\}^{N_t \times N_t}$  est la matrice de permutation qui correspond à l'ordre optimal de détection :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{N_r 1} & \cdots & q_{N_r N_t} \end{bmatrix}; \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & r_{N_t N_t} \end{bmatrix}; \mathbf{\Pi} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{N_t 1} & \cdots & \pi_{N_t N_t} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

En multipliant, les deux côtés de l'équation (3.1) par  $\mathbf{Q}^H$ , la matrice hermitienne de  $\mathbf{Q}$ , nous obtenons :

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{R}\bar{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}}, \quad (3.4)$$

où  $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{Q}^H \mathbf{y}$ ,  $\bar{\mathbf{x}} = \Pi \mathbf{x}$  et  $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{Q}^H \mathbf{n}$ . Sachant que  $\mathbf{R}$  est une matrice triangulaire supérieure donc  $r_{i,j} = 0$  si  $i > j$ , chaque symbole reçu est alors de la forme :

$$\tilde{y}_i = r_{i,i} \bar{x}_i + \sum_{j=i+1}^{N_t} r_{i,j} \bar{x}_j + \tilde{n}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_t. \quad (3.5)$$

Ainsi, le récepteur détecte les éléments de  $\bar{\mathbf{x}}$  l'un après l'autre, en débutant par le symbole  $\hat{x}_{N_t}$  avec :

$$\hat{x}_{N_t} = q\left(\frac{\tilde{y}_{N_t}}{r_{N_t N_t}}\right). \quad (3.6)$$

Ensuite, la composante détectée  $\hat{x}_{N_t}$  est supprimée à l'étape suivante pour détecter  $\hat{x}_{N_t-1}$ . Cette opération est répétée jusqu'à ce que toutes les composantes soient détectées :

$$\hat{x}_i = q\left(\frac{\tilde{y}_i - \sum_{j=i+1}^{N_t} r_{i,j} \hat{x}_j}{r_{i,i}}\right), \quad i = (N_t - 1), (N_t - 2), \dots, 1 \quad (3.7)$$

où  $q(\cdot)$  est la fonction de quantification. Le rapport signal à bruit (SNR) de chaque canal est déterminé par les éléments diagonaux de la matrice  $\mathbf{R}$ . A la  $i^{\text{ième}}$  antenne, il est obtenu par :

$$\rho_i = \frac{r_{i,i}^2 P_t}{N_t \sigma^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N_t. \quad (3.8)$$

Avec une modulation BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), le taux d'erreurs par symbole (*Symbol Error Rate SER*) à la  $i^{\text{ième}}$  antenne est donné par [32] :

$$SER_i = Q(\sqrt{2\gamma_i}), \quad i = 1, 2, \dots, N_t, \quad (3.9)$$

où  $Q(\cdot)$  est la fonction gaussienne d'erreur.

Soit  $L_p$  la longueur du paquet de symboles, le taux d'erreur par paquet (*Packet Error Rate PER*) est exprimé comme suit :

$$PER = 1 - \left[ \prod_{i=1}^{N_t} (1 - SER_i) \right]^{L_p}. \quad (3.10)$$

Le débit utile normalisé DUN (appelé aussi efficacité, en anglais *throughput*) suivant le protocole *Go-Back-N* avec une fenêtre de  $W$  paquets et le débit utile normalisé suivant le protocole *Selective-Repeat* [71] sont donnés respectivement par :

$$\eta_{GBN} = N_t \times (1 - PER) / [1 + (W - 1) \times PER], \quad (3.11)$$

$$\eta_{SR} = N_t \times (1 - PER). \quad (3.12)$$

Pour trouver la meilleure combinaison d'antennes émettrices, le récepteur cherche parmi toutes les combinaisons possibles celles qui donne le meilleur DUN  $\eta_{GBN}$  ou  $\eta_{SR}$  (selon le protocole

utilisé). Ensuite, il retransmet une liste triée appelée AS (*Antenna Selection*) avec la meilleure combinaison de  $1, 2, \dots$  et  $N_t$  antennes et le débit utile normalisé correspondant, à l'émetteur via un canal de retour (*feed-back*) supposé sans erreur. La figure 3.1 illustre un exemple de la liste AS où  $N_t = 4$  et  $\eta_4 > \eta_2 > \eta_3 > \eta_1$ . Finalement, l'émetteur sélectionne le meilleur sous-ensemble de la liste AS pour initier ses données. Dans l'exemple de la figure 3.1, l'émetteur choisira le sous ensemble  $\{1, 2, 3, 4\}$ .

Antenna Quantity	Selected Antennas ID's	Associated throughput
4	1, 2, 3, 4	$\eta_4$
2	2, 4	$\eta_2$
3	1, 2, 4	$\eta_3$
1	2	$\eta_1$

FIGURE 3.1 – Exemple de liste AS.

Notons que dans ce paragraphe, nous avons présupposé que  $N_t \leq N_r$ . Dans le cas contraire, il n'est pas possible de détecter tous les symboles émis, le système de détection sera sous-déterminé (plus d'inconnus que d'équations).

### 3.2.2 Détection de données dans un réseau multi-utilisateurs

La sélection des antennes émettrices, comme décrite au paragraphe 3.2.1, donne la possibilité au récepteur de choisir la meilleure combinaison pour maximiser le débit utile normalisé de chaque lien  $T_x$ - $R_x$  où l'indice  $x$  est l'identifiant du couple. Dans un contexte ad-hoc multi-utilisateurs, elle permet également les transmissions simultanées des données dans une même zone de détection pour améliorer le débit utile normalisé global du réseau. En effet, l'annulation des interférences dues aux émissions simultanées est possible si et seulement si le nombre d'antennes émettrices dans la zone de détection de chaque récepteur est inférieur ou égal au nombre de ses antennes réceptrices ( $\sum N_{tx} \leq N_r$ ). Sinon, le système de détection sera sous-déterminé. Nous appelons, dans la suite, cette restriction la condition AQR (*Antenna Quantity Restriction*).

Pour décrire la technique de détection, nous utilisons un exemple typique de réseau VANET présenté sur la figure 3.2. Dans ce scénario, nous considérons quatre véhicules : deux émetteurs  $T_1$  et  $T_2$  équipés chacun de  $N_t$  antennes émettrices et leurs récepteurs respectifs  $R_1$  et  $R_2$  équipés chacun de  $N_r$  antennes réceptrices. Les cercles autour de  $T_1$  et  $T_2$  définissent leurs zones d'émission et les cercles autour de  $R_1$  et  $R_2$  représentent leurs zones de détection. Nous supposons que  $T_1$ - $R_1$  et  $T_2$ - $R_2$  ont sélectionné respectivement  $K_1$  et  $K_2$  antennes émettrices comme décrit

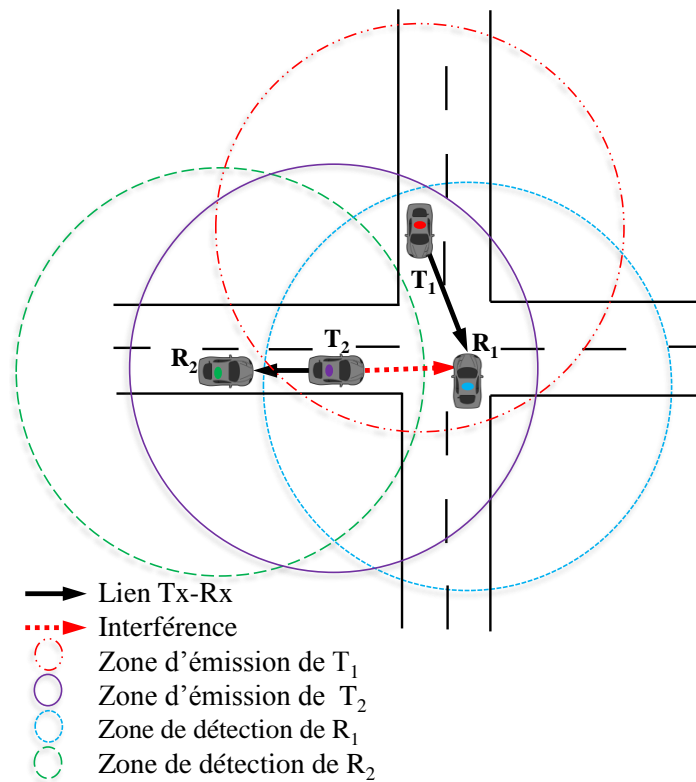


FIGURE 3.2 – Exemple de scénario VANET avec 4 véhicules.

au paragraphe 3.2.1 et que leurs choix respectent la condition AQR, c'est-à-dire  $K_1 + K_2 \leq N_r$ . En émettant un paquet de données de taille  $L_p$ , le vecteur reçu par  $R_1$  est donné par :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{N}, \quad (3.13)$$

où  $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N_r \times L_p}$  est la matrice de symboles reçus et  $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{N_r \times L_p}$  est la matrice représentant le bruit de fond gaussien. La matrice canal  $\mathbf{H}$  peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2], \quad (3.14)$$

où  $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N_r \times K_1}$  est la matrice canal entre  $T_1$  et  $R_1$ , et  $\mathbf{H}_2 \in \mathbb{C}^{N_r \times K_2}$  est la matrice canal entre  $T_2$  et  $R_1$ . La matrice de données  $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{(K_1+K_2) \times L_p}$ , contient des données émises par  $T_1$  et  $T_2$ . Elle est décomposée en :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

où  $\mathbf{X}_1 \in \mathbb{C}^{K_1 \times L_p}$  est la matrice de données envoyées par  $T_1$  et  $\mathbf{X}_2 \in \mathbb{C}^{K_2 \times L_p}$  celles par  $T_2$ . Ainsi l'équation (3.13) peut être écrite sous la forme :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{H}_2 \mathbf{X}_2 + \mathbf{N}. \quad (3.16)$$

La partie  $\mathbf{H}_2 \mathbf{X}_2$  représente l'interférence de  $T_2$  sur  $R_1$ . Toutefois,  $R_1$  peut détecter tous les symboles émis  $[\mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2]^T$  tant que  $K_1 + K_2 \leq N_r$ . La détection se fait en  $K_1 + K_2$  étapes, d'abord celle du symbole  $\hat{x}_{K_1+K_2}$  jusqu'à celle du symbole  $\hat{x}_1$  comme montré par les équations (3.6) et (3.7).

### 3.3 Protocole MAC proposé

L'utilisation de l'algorithme de sélection d'antennes proposé précédemment nécessite des échanges des listes d'antennes AS entre les véhicules. Les paquets de contrôle RTS et CTS employés dans le protocole MAC IEEE 802.11p ne sont pas suffisants. À cette fin, nous présentons dans ce qui suit la description détaillée du protocole proposé pour un réseau VANET.

#### 3.3.1 Mécanisme du protocole proposé

Le nouveau protocole MAC utilise, en plus des paquets RTS et CTS, des nouveaux paquets de contrôle. Il se décompose en trois phases : une phase pour échanger les listes AS, une phase pour la négociation entre les véhicules du nombre d'antennes utilisées par chaque véhicule et finalement une phase pour l'émission simultanée de données. Nous utilisons l'exemple de la figure 3.2 pour décrire les différentes étapes du protocole.



**Phase d'échange de liste d'antennes** Tous les couples  $T_x$ - $R_x$  dans la même zone radio se succèdent pour l'accès au canal pour cette phase. Supposons que  $T_1$  est le premier à en avoir l'accès, il envoie un RASL (*Request for Antenna Selection List*) à  $R_1$  et ce dernier répond par RASL-ACK (*Request for Antenna Selection List-ACKnowledgment*) pour accepter la connexion. Puis,  $T_1$  diffuse une séquence d'apprentissage à tous les véhicules dans sa zone de transmission, afin de leur permettre d'estimer le canal entre eux et  $T_1$ . L'estimation du canal par les voisins permettra à ces derniers d'annuler les éventuelles interférences pendant la communication ente  $T_1$  et  $R_1$ . En se basant sur l'estimation de canal,  $R_1$  cherche les meilleurs sous-ensembles d'antennes émettrices de  $1, 2, \dots, N_t$  en termes de débit utile normalisé. Ensuite, il crée une liste triée AS avec le nombre d'antennes, les identifiants des antennes et le débit utile normalisé correspondant. Puis  $R_1$  retransmet cette liste via ASL (*Antenna Selection List*) à  $T_1$ . Cette liste est ensuite diffusée par  $T_1$  aux voisins via B-RTS (*Broadcast AS-Request To Send*). Cette phase est répétée jusqu'à ce que tous les véhicules échangent leurs listes AS (dans cet exemple entre  $T_2$  et  $R_2$ ). La figure 3.3 détaille l'échange de paquets de cette phase pour le scénario de la figure 3.2.

**Phase de négociation** L'objectif de cette phase est de négocier le nombre d'antennes émettrices utilisées par chaque véhicule afin de permettre les communications simultanées. Chaque récepteur sélectionne le sous-ensemble de la liste AS qui remplit la condition AQR et maximise le débit utile normalisé global, c'est-à-dire  $\text{Max}(\sum_{x=1}^{nb} \eta_x)$ , où  $nb$  est le nombre de couple émetteur-récepteur  $T_x$ - $R_x$ . Ensuite, il diffuse le sous-ensemble d'antennes sélectionnées via B-CTS (*Broadcast AS-Clear To Send*). Tous les voisins ayant reçu cette liste mettent à jour leur liste AS finale et diffusent les informations sur RTS. Cette phase est répétée jusqu'à ce que la condition AQR soit satisfaite par tous les véhicules. Certains récepteurs peuvent modifier le choix d'antennes d'un voisin, si ce dernier admet un véhicule caché où il n'est pas en mesure de connaître la présence d'autres émetteurs en dehors de sa zone de communication. La figure 3.4 décrit cette phase pour le scénario étudié.

**Phase d'émission de données** Dans cette phase, les récepteurs émettent successivement un CTS à leurs interlocuteurs respectifs. Une fois reçu, ces derniers commencent leurs transmissions des données suivant la liste d'antennes négociée dans la phase précédente. Chaque récepteur de son côté confirme la réception avec ACK. Dans le cas échéant, les paquets seront retransmis suivant le protocole utilisé GBN ou SR. Cette phase est illustrée dans le diagramme de séquence de la figure 3.5.

La figure 3.6 donne un exemple du contenu des paquets de contrôle pour échanger et négocier le nombre d'antennes utilisées (ASL, B-RTS, B-CTS et RTS).

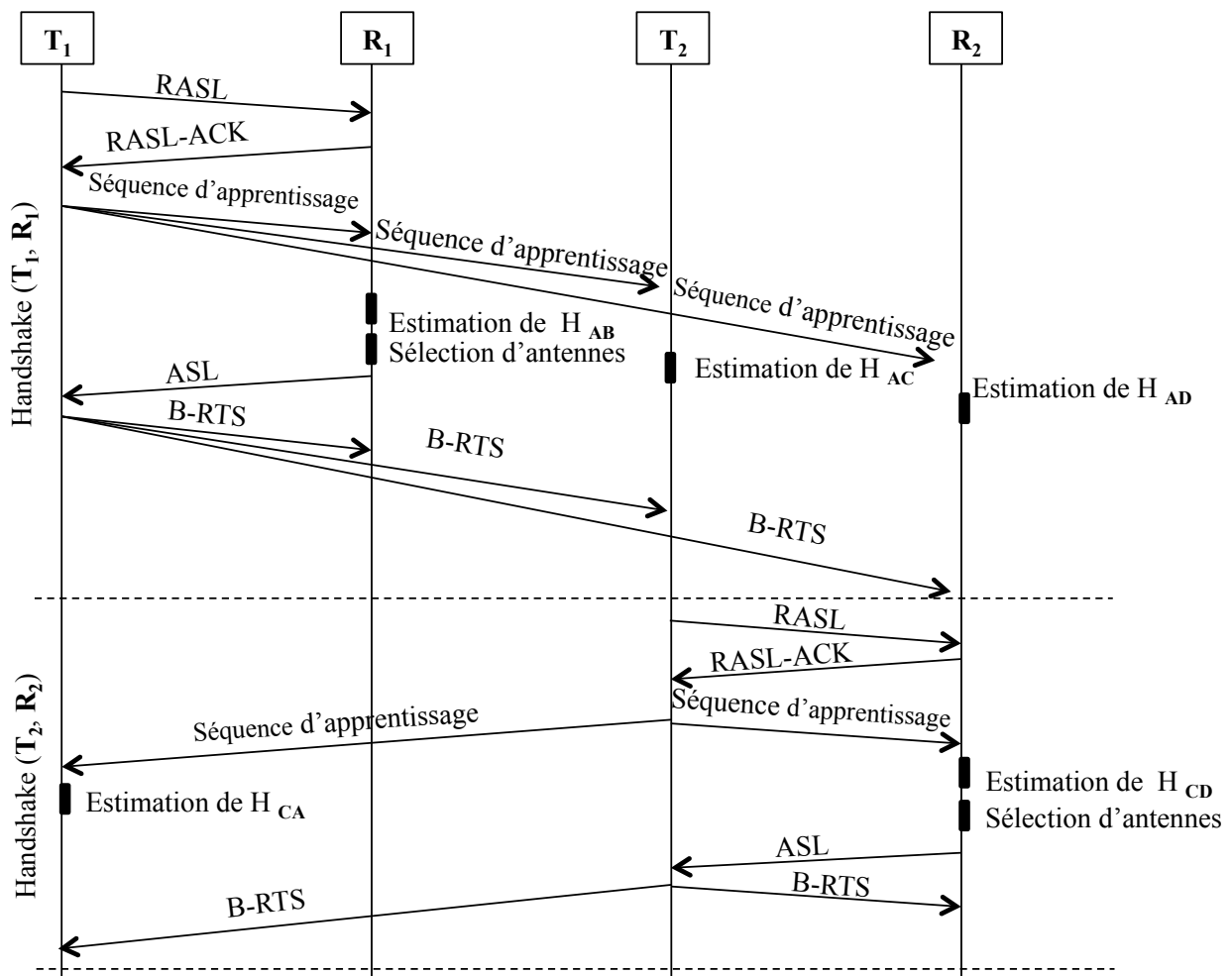


FIGURE 3.3 – Diagramme de la phase d'échange de la liste d'antennes AS.

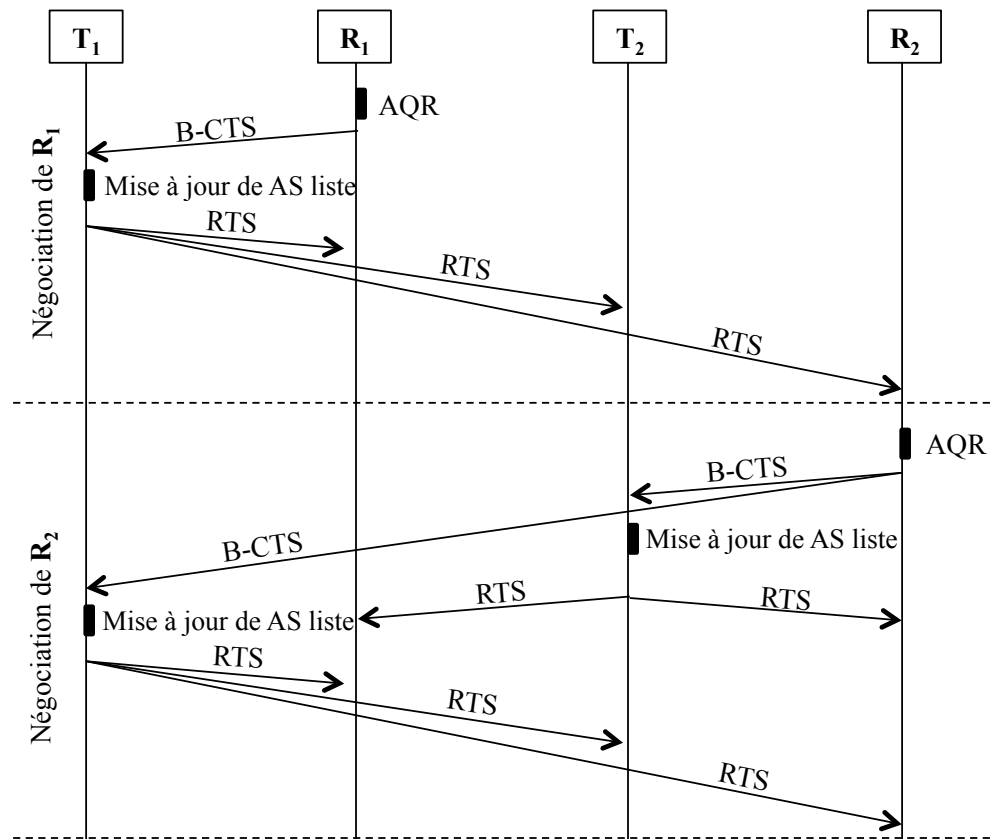


FIGURE 3.4 – Diagramme de séquence de la phase de négociation.

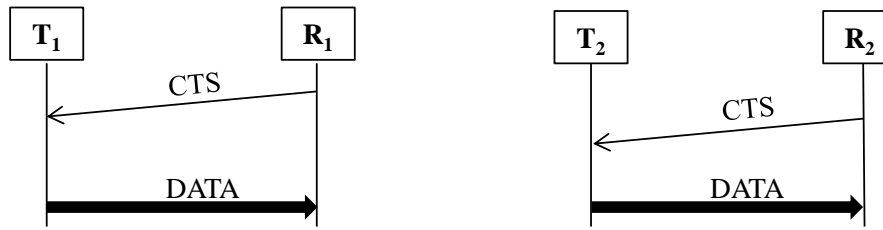


FIGURE 3.5 – Diagramme de séquence de la phase d'émission de données.

ASL from  $\mathbf{R}_1$  to  $\mathbf{T}_1$

Antenna Quantity	Selected Antennas ID's	Associated throughput
4	1, 2, 3, 4	$\eta_4$
2	2, 4	$\eta_2$
3	1, 2, 4	$\eta_3$
1	2	$\eta_1$

ASL from  $\mathbf{R}_1$  to  $\mathbf{T}_1$

Antenna Quantity	Selected Antennas ID's	Associated throughput
1	3	$\eta_1$
2	2, 3	$\eta_2$
3	1, 2, 3	$\eta_3$
4	3	$\eta_4$

B-RTS from  $\mathbf{T}_1$  to  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{T}_2$  and  $\mathbf{R}_2$

Antenna Quantity	Associated throughput
4	$\eta_4$
2	$\eta_2$
3	$\eta_3$
1	$\eta_1$

B-RTS from  $\mathbf{T}_2$  to  $\mathbf{R}_2$  and  $\mathbf{T}_1$

Antenna Quantity	Associated throughput
1	$\eta_1$
2	$\eta_2$
3	$\eta_3$
4	$\eta_4$

B-CTS from  $\mathbf{R}_1$  to  $\mathbf{T}_1$

$\mathbf{T}_1$ : 4
--------------------

B-CTS from  $\mathbf{R}_1$  to  $\mathbf{T}_1$  and  $\mathbf{T}_2$

$\mathbf{T}_1$ : 2
$\mathbf{T}_2$ : 1

RTS from  $\mathbf{T}_1$  to  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{T}_2$  and  $\mathbf{R}_2$

$\mathbf{T}_1$ : 4
--------------------

RTS from  $\mathbf{T}_2$  to  $\mathbf{R}_2$  and  $\mathbf{T}_1$

$\mathbf{T}_1$ : 2
$\mathbf{T}_2$ : 1

RTS from  $\mathbf{T}_1$  to  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{T}_2$  and  $\mathbf{R}_2$

$\mathbf{T}_1$ : 2
$\mathbf{T}_2$ : 1

FIGURE 3.6 – Exemple du contenu des paquets de contrôle.

## 3.3.2 Durée d'échange des paquets de contrôle

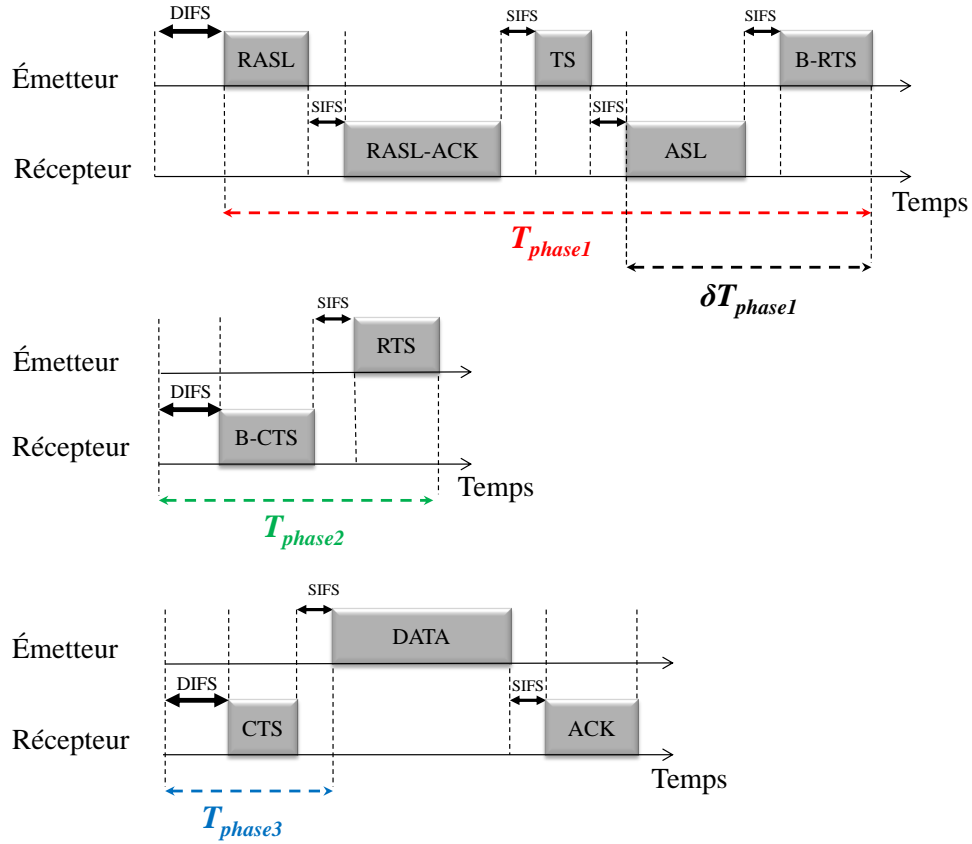


FIGURE 3.7 – Durée d'échange de paquets de contrôle.

De la même manière que le protocole MAC IEEE 802.11p, le protocole MAC proposé impose des durées minimales de silence entre les paquets de contrôle (voir le paragraphe 2.3.1). Tous les paquets sont espacés par un *SIFS* et toutes les phases du protocole commencent par un temps d'attente *DIFS*. Ainsi, chaque phase du protocole dure  $T_{phase1}$  pour la durée de la phase d'échange des listes AS,  $T_{phase2}$  pour la durée de la phase de négociation et  $T_{phase3}$  pour la durée de la phase de la transmission commune des données :

$$T_{phase1} = DIFS + t^{RASL} + SIFS + t^{RASL-ACK} + SIFS + t^{TS} + SIFS + t^{ASL} + SIFS + t^{B-RTS}, \quad (3.17)$$

$$T_{phase2} = DIFS + t^{B-CTS} + SIFS + t^{RTS}, \quad (3.18)$$

$$T_{phase3} = DIFS + t^{CTS} + SIFS. \quad (3.19)$$

Dans un réseau de  $nb$  couples émetteur- récepteur, le  $i^{\text{ième}}$  émetteur ayant accès au canal débute sa transmission de données après une période  $\delta_{T_i}$  estimée à :

$$\delta_{T_i} = \delta T_{phase1} + (nb - i)T_{phase1} + N(T_{phase2} + T_{phase3}), \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (3.20)$$

où  $\delta T_{phase1}$  est la période entre l'estimation de canal et la fin de la première :

$$\delta T_{phase1} = t^{\text{ASL}} + \text{SIFS} + t^{\text{B-RTS}}. \quad (3.21)$$

La durée d'échange des paquets de contrôle varie selon l'ordre d'accès au canal pour la première phase  $\delta_{T_1} > \delta_{T_2} > \dots > \delta_{T_{nb}}$ .

### 3.3.3 Spécification du protocole MAC dans un réseau VANET

L'algorithme de sélection d'antennes proposé au paragraphe 3.2.1 est basé sur l'estimation du canal par le récepteur. Cette estimation n'est fiable que pendant le temps de cohérence (étudié au paragraphe 1.11). Une partie de ce temps est utilisée pour l'échange de paquets de contrôle entre les véhicules. Ainsi, chaque émetteur peut transmettre des données pendant une période définie par :

$$\Delta_{T_x} = T_{c_x} - \delta_{T_i}, \quad (3.22)$$

où l'indice  $x$  correspond à l'identifiant du couple émetteur-récepteur  $T_x$ - $R_x$  et l'indice  $i$  correspond à l'ordre d'accès de l'émetteur  $T_x$  au canal pour la phase d'échange de la liste AS. Nous notons que la durée  $T_{c_x}$  pour chaque lien  $T_x$ - $R_x$ .

Un émetteur  $T_x$  initie ses données pendant le temps pré-estimé  $\Delta_{T_x}$ . Quand ce dernier s'écoule, il attend jusqu'à ce que tous les émetteurs occupant le canal finissent aussi leurs émissions. Ensuite, pour continuer les transmissions,  $T_x$  demande de nouveau à son récepteur une nouvelle liste AS via RASL. Le récepteur répond par RASL-ACK si la puissance du signal reçu  $P_r$  est supérieure ou égale à sa sensibilité  $R_s$  ( $P_r \geq R_s$ ). Le RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) est utilisé comme indicateur de la puissance à la réception [72]. Si la puissance du signal reçu n'est pas suffisante, c'est-à-dire inférieur à la sensibilité du récepteur, aucun paquet de contrôle ne sera renvoyer à l'émetteur. L'algorithme 3.1 récapitule les différentes étapes du protocole MAC.

## 3.4 Résultats de simulations

Dans ce paragraphe, nous étudions les performances de l'approche proposée avec différents scénarios véhiculaires.

---

**Algorithme 3.1** Algorithme proposé de sélection d’antennes émettrices

---

**Entrée :** VANET ;

**Tant que** les véhicules demandent de transmettre des données **faire**

**Pour tout**  $T_x$ - $R_x$  **faire**

**Si**  $P_r \geq R_s$  **alors**

      Phase d’échange de la liste d’antennes AS ;

**Fin si**

**Fin pour**

**Pour tout**  $T_x$ - $R_x$  **faire**

**Si** la condition AQR n’est pas satisfaite **alors**

      Phase de négociation ;

**Fin si**

**Fin pour**

**Pour tout**  $T_x$ - $R_x$  **faire**

**Répéter**

      Transmission simultanées des données ;

**jusqu’à** la fin de  $\Delta_{T_x}$

    Attendre jusqu’à ce que tous les émetteurs finissent la phase d’émission des données ;

**Fin pour**

**Fin tant que**

---

### 3.4.1 Environnement de simulation

Pour générer un environnement VANET, nous choisissons le générateur de mobilité SUMO [9] et la base de données géographique libre OpenStreetMap [10]. Les mesures de performances sont obtenues avec des simulations Monte Carlo avec MATLAB où le lien entre SUMO et MATLAB s’effectue avec l’interface TraCi4Matlab [73]. Cette interface permet d’obtenir une sorte de base de données avec les identifiants des véhicules, les positions, les vitesses, etc.

Nous configurons deux scénarios de mobilité : le premier scénario illustré par la figure 3.8 décrit un milieu urbain. Il présente la carte routière de la place Charles-de-Gaulle à Paris centré sur l’Arc de triomphe. Le second scénario présenté par la figure 3.9 décrit un environnement autoroutier. Il présente une partie de l’autoroute Paris-Valenciennes.

Nous supposons que tous les émetteurs transmettent leurs données via un canal Nakagami pendant une durée de simulation  $T_{sim}$  tant que la puissance de réception est suffisante pour recevoir correctement les données ( $P_r \geq R_s$ ). L’affaiblissement de parcours est donnée par l’équation (1.7). Nous supposons que si l’émetteur ou le récepteur quitte la zone de simulation, la communication entre les deux véhicules est interrompue. Nous considérons aussi que tous les récepteurs ont la même sensibilité  $R_s$ . Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent respectivement les paramètres de paquets de contrôle et les paramètres de simulation utilisés.

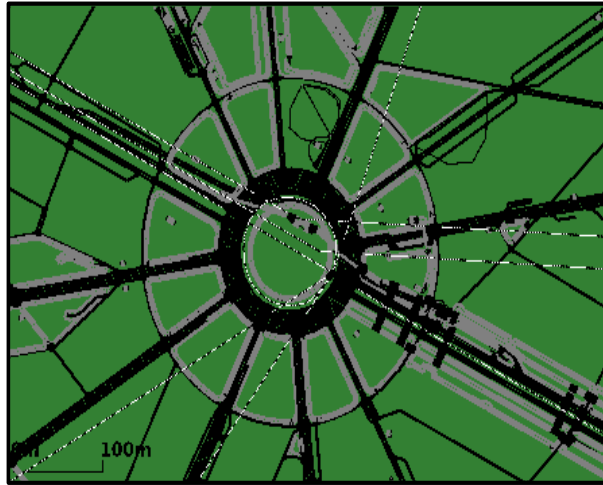


FIGURE 3.8 – Scénario 1 de carte routière : zone urbaine.



FIGURE 3.9 – Scénario 2 de carte routière : autoroutes.



TABLE 3.1 – Paramètres de paquets de contrôle.

Time Slot = $\delta$	20 $\mu s$
SIFS	10 $\mu s$
DIFS=SIFS + $2\delta$	50 $\mu s$
Taille de RASL	20 octets
Taille de RASL-ACK	14 octets
Taille de TS	8 octets
Taille de ASL	22 octets
Taille de B-RTS	20 octets
Taille de B-CTS	14 octets
Taille de RTS	20 octets
Taille de CTS	14 octets
Débit de trame de contrôle	2 Mbps

TABLE 3.2 – Paramètres de simulation 1.

Paramètres	Notations	Valeurs
Fréquence de la porteuse	$f$	5.9 GHz
Temps de simulation	$T_{sim}$	500 s
Nombre de simulations		10
Puissance émise	$P_t$	30 dBm
Sensibilité du récepteur	$R_s$	-90 dBm
Gain d'antenne émettrice	$G_t$	0 dBi
Gain d'antenne réceptrice	$G_r$	0 dBi
Distance référence	$d_{ref}$	1 m
Puissance reçue de référence	$P_{ref}$	0.0164 mW
Durée de trame		8 $\mu s$
Longueur d'une trame de données	$L_p$	180 symboles
Configuration du réseau		Single hop
Protocole de liaison de données		GBN or SR
Taille de la fenêtre Go-Back-N	$W$	4 paquets
Modèle du canal		Nakagami
Modulation		BPSK
Paramètre m-Nakagami		1.5
Exposant d'affaiblissement de parcours	$\alpha$	3
Nombre d'antennes émettrices	$N_t$	4
Nombre d'antennes réceptrices	$N_r$	4

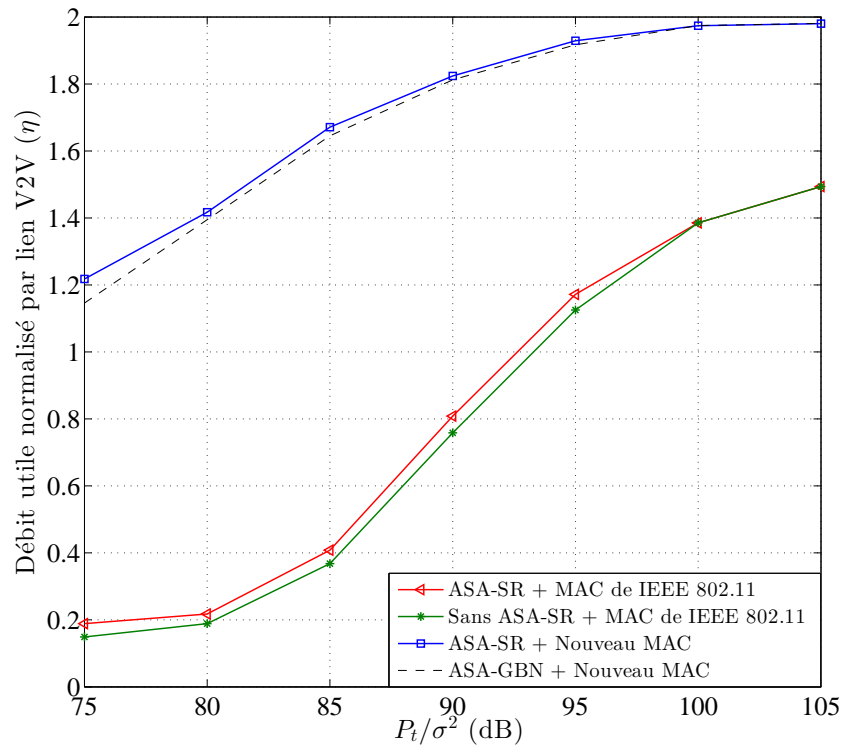


FIGURE 3.10 – Débit utile normalisé du premier scénario (100 véhicules, vitesses de circulation urbaine).

### 3.4.2 Résultats de simulation

#### Premier scénario :

Dans ce scénario, nous considérons 100 véhicules circulant aléatoirement sur la carte routière de la figure 3.8. Les résultats de simulation en termes de débit utile normalisé DUN sont présentés dans la figure 3.10 avec 4 configurations différentes : sans l'algorithme de sélection d'antennes ASA<sup>1</sup> et avec le protocole MAC IEEE 802.11p en employant SR ; avec l'algorithme de sélection d'antennes ASA et avec le protocole MAC IEEE 802.11p en employant SR ; avec l'algorithme de sélection d'antennes ASA et avec le nouveau protocole MAC en employant SR ; avec l'algorithme de sélection d'antennes ASA et avec nouveau protocole MAC en employant GBN.

Dans un premier temps, nous évaluons le gain apporté par l'utilisation de l'algorithme de sélection d'antennes d'émission (avec le protocole SR). Nous constatons qu'à l'utilisation de l'algorithme ASA, le débit utile normalisé s'améliore légèrement à faible SNR et puis devient presque identique à celui donné sans sélection. Pour justifier ces constatations, nous représentons dans la

1. ASA : Antenna Selection Algorithm.

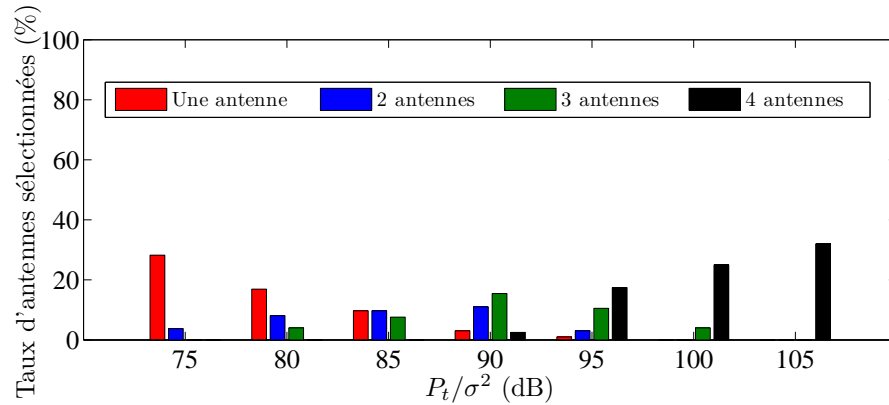


FIGURE 3.11 – Taux d’antennes sélectionnées du premier scénario en fonction du SNR d’entrée. L’algorithme de sélection d’antennes émettrices et le protocole MAC IEEE 802.11p sont appliqués.

figure 3.11 le taux de sélection d’antennes en fonction du SNR. En effet, quand le SNR est très faible (à 75 dB), une unique antenne est souvent choisie et plus le SNR s’améliore plus les véhicules sélectionnent d’antennes émettrices. Par conséquent, l’utilisation par défaut de toutes les antennes disponibles sans tenir compte du SNR diminue le DUN de chaque lien V2V et par la suite le DUN global du réseau. D’autres part, quand le SNR s’améliore, les véhicules sélectionnent toutes les antennes disponibles (où  $N_t \leq N_R$ ) et le débit utile normalisé devient semblable à celui donné sans sélection d’antennes.

Dans un second temps, nous étudions avec le même scénario 1 le gain apporté par l’utilisation du nouveau protocole MAC. Nous comparons les performances obtenues avec sélection d’antennes obtenues et le protocole MAC IEEE 802.11p à celles obtenues avec sélection d’antennes et le nouveau protocole proposé. Nous observons dans la figure 3.10 que le DUN obtenu par le nouveau protocole MAC offre un débit utile normalisé nettement plus élevé. La figure 3.12 illustre le taux d’utilisation d’antennes avec la nouvelle approche. Nous constatons que le nouveau protocole MAC rend les véhicules choisissant moins d’antennes pour satisfaire la condition AQR et ainsi permettre à plus de véhicules de communiquer. Ceci réduit le DUN de chaque lien V2V mais en revanche le protocole augmente considérablement le DUN global du réseau.

D’autre part, nous remarquons que le débit utile normalisé avec le protocole SR est légèrement supérieur à celui donné avec le protocole GBN. En effet, l’algorithme de transmission de paquets perdus ou endommagés de GBN provoque de nombreuses retransmissions inutiles qui conduisent à une légère baisse du débit utile normalisé.

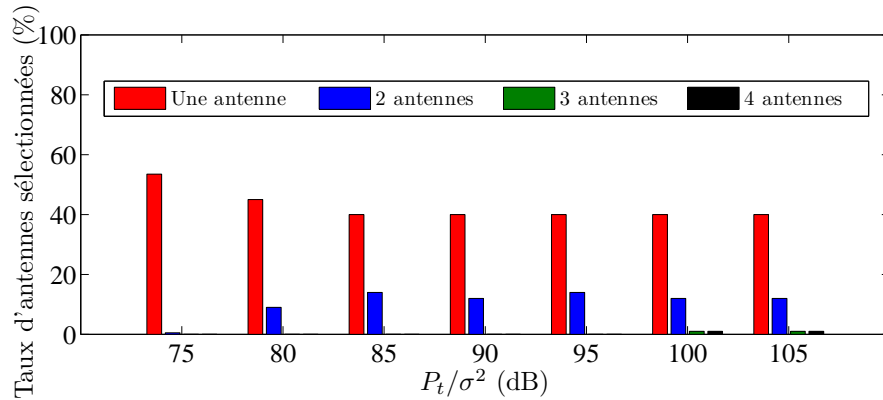


FIGURE 3.12 – Taux d'antennes sélectionnées du premier scénario en fonction du SNR d'entrée. L'algorithme de sélection d'antennes émettrices et le nouveau protocole MAC sont appliqués.

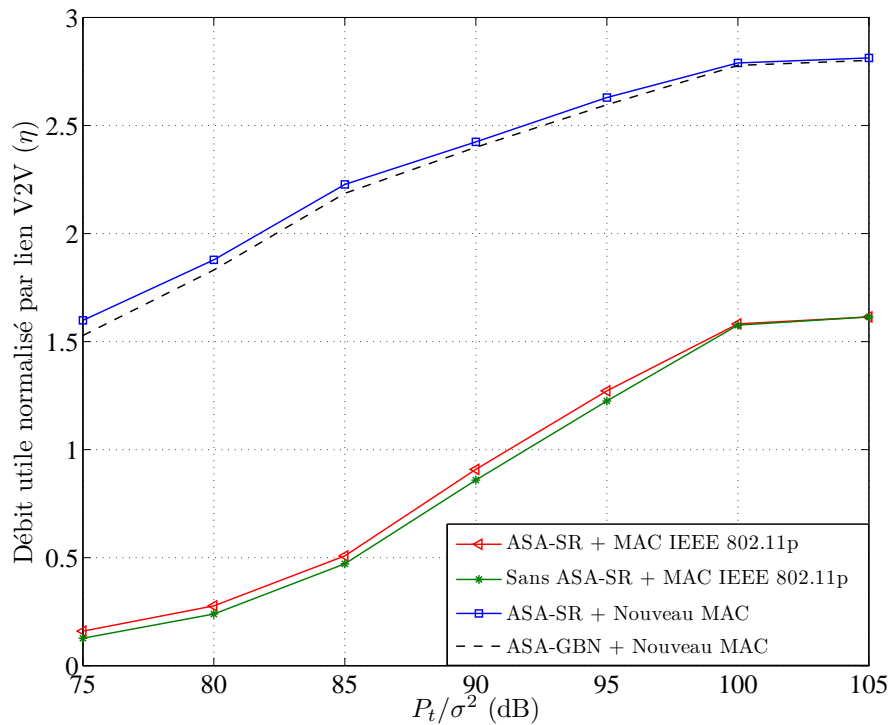


FIGURE 3.13 – Débit utile normalisé du premier scénario (30 véhicules, vitesses de circulation urbaine).

**Deuxième scénario :**

Dans cette simulation, nous réduisons le nombre de véhicules de 100 à 30 véhicules circulant dans la carte de la figure 3.8. Nous réalisons ce test dans l'objectif de voir l'impact de la densité sur le débit utile normalisé donné par l'approche proposée. La figure 3.13 montre les résultats de simulation de ce scénario. Nous constatons que le DUN se comporte de la même manière que pour le test précédant. Il s'est légèrement amélioré à des SNRs faibles quand uniquement l'algorithme de sélection d'antennes émettrices est appliqué et il est nettement amélioré avec la combinaison de cet algorithme et le nouveau protocole avec un taux légèrement inférieur avec GBN en comparaison avec l'utilisation de SR.

Pour étudier les répercussions de la densité véhiculaire sur les performances de l'approche *cross-layer*, nous comparons les résultats obtenus dans le premier et le second test (100 vs. 30 véhicules). Nous constatons que le débit utile normalisé augmente quand le réseau est moins dense. En effet, la condition AQR exige que le nombre maximal d'émetteurs simultanés dans une zone de détection soit de  $N_r$ . Dans un réseau de 30 véhicules, il est moins fréquent qu'un récepteur aura plus que  $N_r$  émetteurs dans sa zone de détection et ainsi le nombre de véhicules susceptibles d'être bloqués est moins important.

Dans la figure 3.14 et la figure 3.15, nous représentons les taux d'utilisation d'antennes avec sélection d'antennes en employant le protocole MAC IEEE 802.11p et le nouveau protocole. Nous constatons ainsi que le taux de véhicules en communication est de 32% en employant le protocole IEEE 802.11p et passe à 69% avec le *cross-layer* proposé. Ensuite, en comparant les figures 3.12 et 3.15, nous remarquons que le taux de véhicules en communication est à 54% dans un réseau de 100 véhicules face à un taux de 69% dans un réseau de 30 véhicules.

**Troisième scénario :**

Toujours dans l'objectif de montrer le gain apporté par l'approche proposée, nous testons un nouveau scénario de simulation en considérant 30 véhicules circulant avec des vitesses d'auto-routes suivant la carte présentée dans la figure 3.9. Les conclusions et les résultats auxquels nous sommes arrivés pour les deux précédents scénarios sont aussi confirmés. Comme nous avons précédemment remarqué, le DUN est considérablement amélioré en utilisant l'algorithme de sélection d'antenne conjointement avec le nouveau protocole MAC. En revanche, en comparant avec les résultats de simulation du deuxième et troisième scénario (même nombre de véhicules dans les deux scénarios), nous constatons que le gain est moins important dans la troisième simulation. En effet, les vitesses d'auto-routes considérées dans ce scénario engendrent un effet de Doppler important. Ceci dégrade le DUN et montre que l'approche est sensible à cet effet.

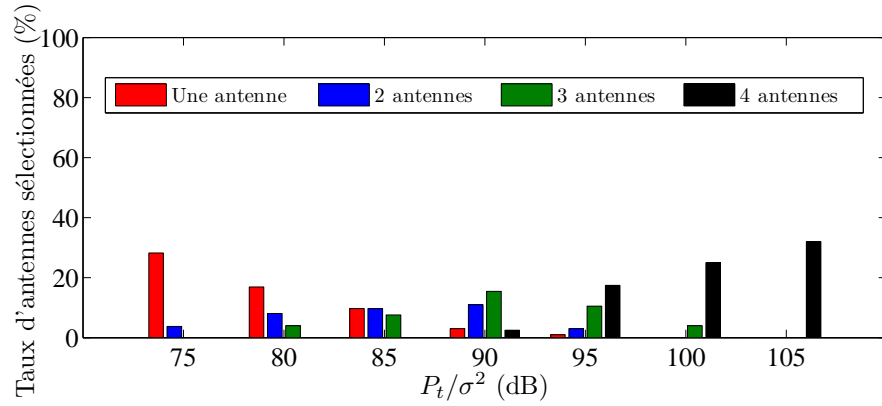


FIGURE 3.14 – Taux d’antennes sélectionnées du deuxième scénario en fonction du SNR d’entrée. L’algorithme de sélection d’antennes émettrices et le protocole MAC IEEE 802.11p sont appliqués.

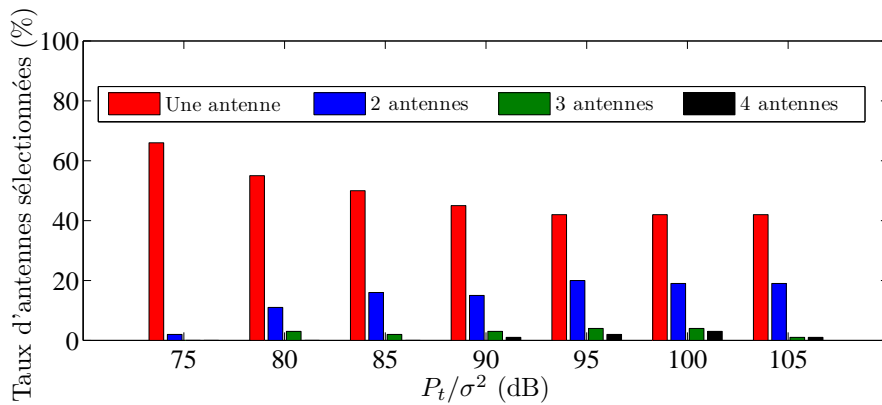


FIGURE 3.15 – Taux d’antennes sélectionnées du deuxième scénario en fonction du SNR d’entrée. L’algorithme de sélection d’antennes émettrices et le nouveau protocole MAC sont appliqués.

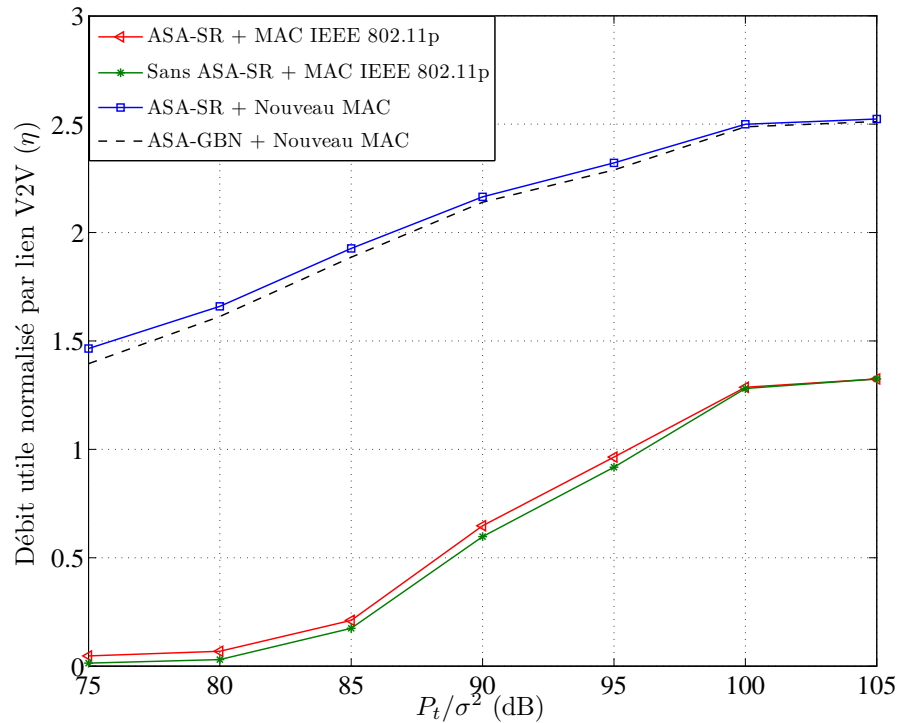


FIGURE 3.16 – Débit utile normalisé du premier scénario (30 véhicules, vitesses sur autoroutes).

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un *cross-layer* PHY/MAC basé sur un algorithme de sélection d’antennes émettrices conjointement avec un protocole MAC adapté. L’objectif était de maximiser le débit utile normalisé de chaque lien V2V dans le réseau ainsi que de réduire l’effet de blocage du récepteur pour maximiser le débit utile normalisé DUN global du réseau. En effet, en se basant sur la connaissance parfaite de canal, l’algorithme de sélection d’antennes offre la possibilité à chaque récepteur de chercher la meilleure combinaison d’antennes émettrices. L’association de la méthode de détection multi-utilisateurs avec ZF-BLAST permet à plusieurs véhicules de communiquer dans la même zone radio sans craindre les interférences. Par ailleurs, le protocole MAC permet d’échanger le choix d’antennes entre tous les véhicules du réseau. Ce choix est soumis à une restriction que nous avons appelé la condition AQR. Cette restriction limite le nombre d’antennes émettrices dans la zone de détection d’un récepteur au nombre de nombre d’antennes réceptrices de ce dernier.

Nous avons simulé cette approche à travers trois scénarios en changeant pour chaque test les vitesses et le nombre de véhicules. À l’issue des résultats obtenus, nous avons montré que le DUN du réseau dépend de la densité. Quand le réseau est dense, les zones d’émission et de

détection des véhicules se chevauchent fréquemment, ce qui rend la satisfaction de la condition AQR parfois difficile à satisfaire et par conséquent certains véhicules restent bloqués. Nous avons remarqué aussi une dégradation du DUN quand la vitesse des véhicules augmente, ce qui est prévisible à cause de l'effet de Doppler.

Pour améliorer le débit utile normalisé dans les réseaux VANETs denses, il est nécessaire d'éviter le plus possible les chevauchements des zones d'émissions et réceptions dans le réseau. À cette fin, dans le prochain chapitre, nous proposons d'ajouter un algorithme d'adaptation de puissance d'émission en fonction de la densité de voisinage. Nous montrons qu'en réduisant les zones d'émission, d'autres récepteurs seront débloqués ce qui aura pour conséquence d'améliorer considérablement le DUN global du réseau.



# CHAPITRE 4

## Architecture cross-layer basée sur un algorithme d'adaptation de la puissance d'émission

---

### 4.1 Introduction

La solution proposée dans le chapitre précédent montre des limites dans les réseaux véhiculaires VANETs denses. Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à améliorer d'avantage le débit utile normalisé dans ces réseaux. Nous ajoutons au *cross-layer* PHY/MAC développé au chapitre 3, un algorithme d'adaptation de la puissance émise en fonction de la densité de voisinage du récepteur. Dans cette nouvelle architecture, la couche MAC vérifie la densité de voisinage pour adapter la puissance émise à la couche PHY. L'objectif est de réduire le nombre d'émetteurs interférents dans chaque zone de détection.

Nous consacrons le paragraphe suivant à la présentation de quelques algorithmes d'adaptation de puissance émise connus dans la littérature. Ensuite, dans le troisième paragraphe, nous présentons l'algorithme que nous proposons, ainsi que le nouveau protocole MAC qui doit gérer à la fois l'algorithme de sélection d'antennes émettrices et l'algorithme d'adaptation de la puissance émise. Dans le quatrième paragraphe, nous étudions les performances obtenues par simulation de différents scénarios VANETs sur la grille de Manhattan. Finalement, nous finissons ce chapitre avec quelques conclusions.

## 4.2 Motivations

Un niveau élevé et non-adaptés de puissance engendre plus d'interférences inter-véhiculaires. Pour cette raison, des algorithmes d'adaptation de puissance deviennent des solutions indispensables. Ils définissent quand et comment basculer vers un nouveau niveau de puissance d'émission. Ils identifient aussi en temps réel le niveau de puissance nécessaire pour diverses fins, telles que résoudre un problème d'isolement, un problème de dysconnectivité ou pour maximiser le débit. Étant donné que ces algorithmes ne nécessitent pas des calculs complexes, plusieurs travaux de recherches ont proposé une technique d'adaptation de puissance dans les réseaux véhiculaires.

Dans la suite de ce paragraphe, nous nous intéressons aux algorithmes qui adaptent la puissance d'émission des véhicules en fonction de la densité de voisinage de leurs récepteurs et nous présentons dans ce cadre deux algorithmes de référence dans la littérature.

### 4.2.1 Algorithme d'adaptation de puissance de *Rawat*

Dans [74], les auteurs s'intéressent à atténuer les effets néfastes de l'utilisation d'une puissance d'émission élevée afin d'augmenter la durée de la liaison de communication en cas de faible densité de trafic. Ils proposent un algorithme d'adaptation de puissance d'émission, où chaque véhicule adapte sa puissance en fonction de son estimation de la densité de son voisinage.

L'estimation de la densité de voisinage  $D$  peut se faire de deux manières :

- La première méthode est utilisée dans [75], où la densité est obtenue à partir des vitesses. Si un véhicule se déplace à grande vitesse sa densité de voisinage est estimée faible et dans le cas contraire sa densité est estimée élevée.
- La deuxième méthode, décrite dans [74], est plus précise : chaque véhicule écoute les données émises par ses voisins, puis estime le nombre de véhicules aux alentours à partir de l'analyse des numéros des paquets écoutés.

Pour trouver le niveau de puissance adéquat, il faut estimer, en plus de la densité de voisinage  $D$ , le diamètre de la zone d'émission. Il est donné par l'expression suivante [75] :

$$T_r = \min \left\{ R_l(1 - D), \sqrt{\frac{R_l \ln R_l}{D}} + \beta R_l \right\} \quad (\text{en mètres}), \quad (4.1)$$

où  $R_l$  (en mètres) est la longueur du segment de route sur lequel le véhicule a estimé sa densité et  $\beta$  est une constante de la théorie du flux de trafic [75].

Une fois  $T_r$  déterminé, chaque véhicule choisit la puissance d'émission nécessaire suivant le tableau 4.1. Les données de ce tableau sont obtenues par des simulations de modèles de propagation

TABLE 4.1 – Recherche de la puissance d’émission en fonction de la zone de transmission selon [74].

Zone de transmission $T_r$ (m)	Puissance d’émission $P_t$ (dBm)
0-9	-20
10-49	-12
50-100	-5
100-125	-3
126-149	1
150-209	4
210-299	6
300-349	10
350-379	12
380-449	14
450-549	17
550-649	20
650-749	24
750-849	27
850-929	29
930-970	31
971-1000	32
>1000	N/A

sans fil pour différents scénarios VANET et les valeurs de puissance attribuées correspondent aux environnements urbain, suburbain et rural. En revanche, si la densité de voisinage est très faible c’est-à-dire inférieure à un seuil minimum  $\tau$  ou si le message est prioritaire, les véhicules sont autorisés à utiliser la puissance maximale. Ce processus d’adaptation de puissance est détaillé dans le pseudocode algorithme 4.2.

#### 4.2.2 Algorithme d’adaptation de puissance de *Caizzone*

Dans [76], les auteurs proposent et évaluent les performances d’un algorithme d’adaptation de puissance dans des réseaux véhiculaires ad-hoc en fonction de la densité de voisinage. L’objectif est de résoudre le problème d’isolement des nœuds dans les zones rurales, afin de garder la connexion le plus longtemps possible. Chaque nœud  $T_x$  estime sa densité de voisinage réciproque  $\hat{N}^R(T_x)$ , c’est-à-dire l’ensemble des nœuds avec lesquels il peut émettre et recevoir des données. En fonction de  $\hat{N}^R(T_x)$ , il augmente ou diminue la puissance d’émission de sorte que le nombre de voisins de chaque nœud se situe toujours entre un seuil minimum  $|\hat{N}^R(T_x)|_{min}$  et un seuil maximum  $|\hat{N}^R(T_x)|_{max}$ . La procédure d’adaptation de la puissance est décrite dans le pseudocode algorithme 4.3.

---

**Algorithme 4.2** Algorithme d'adaptation de la puissance d'émission de *Rawat* [74].

---

**Entrées :** Tableau 4.1,  $\tau, \beta, R_l$ ;

**Sortie :**  $P_t$ ;

**Pour tout**  $t$  **faire**

Estimer la densité de voisinage  $D$ ;

**Si**  $D < \tau$  **ou** le message est propriétaire **alors**

$T_r$  prend la valeur maximale;

**Sinon**

Calculer  $T_r$  avec l'équation (4.1);

**Fin si**

Chercher dans le tableau 4.1 le niveau de la puissance d'émission  $P_t$  correspondant à  $T_r$ ;

**Fin pour**

---

Chaque nœud  $T_x$  commence ses transmissions avec une puissance initiale  $P_{ini} = -35$  dBm. Puis, il augmente ou diminue la puissance d'un échelon  $\Delta = 1$  dBm sans dépasser une puissance maximale  $P_{max} = 24$  dBm. L'algorithme exige que la densité réciproque de voisinage soit au minimum  $|\hat{N}^R(T_x)|_{min} = 3$  et au maximum  $|\hat{N}^R(T_x)|_{max} = 8$ . Ce choix est dérivé d'une précédente étude de la littérature [77] qui montre qu'un seuil maximum trop élevé réduirait la charge transportée à fort trafic tandis qu'un seuil minimum très petit conduit à un pourcentage élevé de nœuds isolés à faible charge.

---

**Algorithme 4.3** Algorithme d'adaptation de la puissance d'émission de *Caizzone* [76].

---

**Entrées :**  $|\hat{N}^R(T_x)|, |\hat{N}^R(T_x)|_{min}, |\hat{N}^R(T_x)|_{max}, P_t, \Delta, P_{max}$ ;

**Sortie :**  $P_{t+1}$ ;

**Si**  $|\hat{N}^R(T_x)| < |\hat{N}^R(T_x)|_{min}$  **alors**

$P_{t+1} = \min\{P_t + \Delta, P_{max}\}$ ;

**Sinon**

**Si**  $|\hat{N}^R(T_x)| > |\hat{N}^R(T_x)|_{max}$  **alors**

$P_{t+1} = P_t - \Delta$ ;

**Sinon**

**Si**  $|\hat{N}^R(T_x)|_{min} \leq |\hat{N}^R(T_x)| \leq |\hat{N}^R(T_x)|_{max}$  **alors**

$P_{t+1} = P_t$ ;

**Fin si**

**Fin si**

**Fin si**

---

### 4.3 Cross-layer PHY/MAC avec adaptation de puissance

Dans ce paragraphe, nous présentons notre algorithme d'adaptation de puissance TPA<sup>1</sup> en fonction de la densité de voisinage afin d'améliorer l'approche proposée dans le chapitre 3. Ensuite,

---

1. TPA : Transmit Power Adaptation-Adaptation de la puissance d'émission.

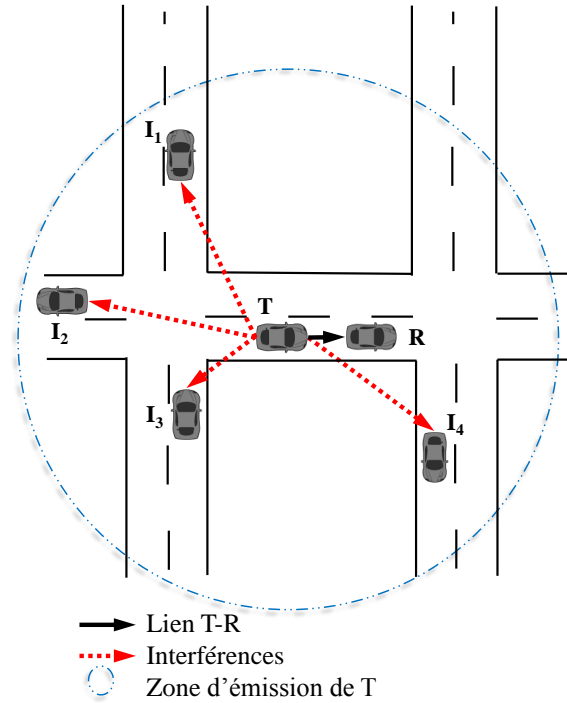


FIGURE 4.1 – Zone d'émission de T sans adaptation de la puissance émise.

nous présentons le protocole MAC associé.

### 4.3.1 Algorithme d'adaptation de puissance émise

La restriction AQR limite le nombre maximal d'émetteurs dans chaque zone de détection d'un récepteur au nombre d'antennes réceptrices de ce dernier. Ainsi, dans le meilleur cas, dans chaque zone de détection  $N_r$  émetteurs peuvent transmettre des données simultanément (chacun avec une seule antenne émettrice). Cependant, dans un réseau VANET dense, il n'est pas rare qu'un récepteur ait plus de  $N_r$  émetteurs voisins. Par conséquent, certains véhicules restent bloqués pendant une transmission en cours, malgré le mécanisme du *cross-layer* décrit dans le paragraphe 3.2. Pour limiter ce blocage, nous pensons à adapter la puissance d'émission en fonction de la densité de voisinage du récepteur. En effet, dans la figure 4.1, un émetteur T choisit un niveau de puissance d'émission aléatoire. Cette puissance se traduit par une zone d'émission vaste et inutile, par conséquent un grand nombre de véhicules potentiellement interférés (4 véhicules dans le cas de la figure 4.1). Ces véhicules sont tous soumis à la restriction AQR avec T et R. D'autre part, dans la figure 4.2, T réduit la puissance d'émission. Le nombre de véhicules interférés est réduit à un seul véhicule. Nous déduisons donc qu'un niveau de puissance d'émission adapté et adéquat diminue le nombre de voisins susceptibles d'être bloqués et ainsi

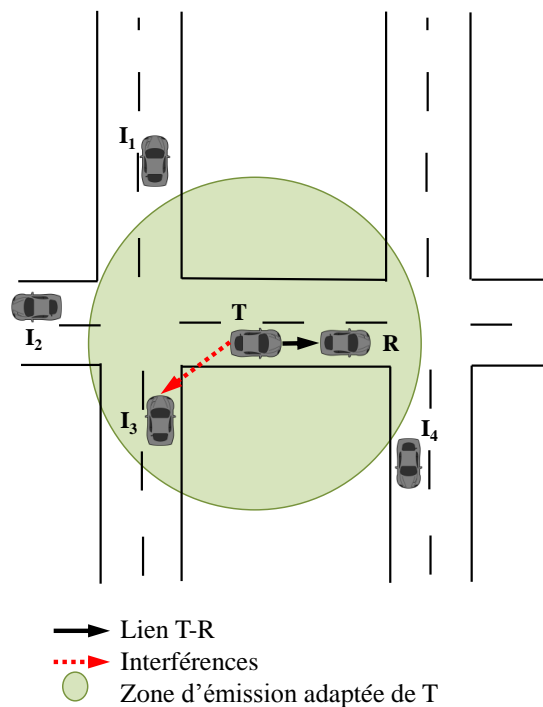


FIGURE 4.2 – Zone d'émission de T avec adaptation de la puissance émise.

les contraintes pour satisfaire la condition AQR diminuent.

À cette fin, nous proposons de joindre au *cross-layer* étudié dans le chapitre 3, un nouveau *cross-layer* PHY/MAC où la couche MAC estime la densité de voisinage du récepteur afin d'adapter la puissance émise au niveau la couche PHY. L'estimation de la densité se fait d'une manière semblable à celle utilisée dans l'algorithme de *Rawat* présenté dans le paragraphe 4.2.1 [74], où chaque véhicule écoute les données émises par ses voisins, puis estime le nombre de véhicules aux alentours à partir de l'analyse des numéros des paquets écoutés. Dans notre algorithme, nous proposons que chaque émetteur analyse les paquets de contrôle échangés avec les voisins, pour estimer le nombre d'émetteurs potentiels dans la zone de détection de son récepteur. L'adaptation de la puissance émise se fait par échelon  $\Delta$  de puissance tel que l'algorithme de *Caizzone* décrit au paragraphe 4.2.2 [76], où chaque nœud augmente ou baisse d'un échelon de puissance de sorte que le nombre de voisins reste borné entre un seuil minimum et maximum. Dans notre algorithme, chaque émetteur, après chaque période  $T_c$ , adapte le niveau de puissance avec un échelon  $\Delta$  suivant de l'estimation de voisinage estimée préalablement. Cette adaptation se fait d'une manière progressive pour garder la connectivité entre les véhicules.

Nous proposons que chaque émetteur adapte sa puissance d'émission  $P_t$  en fonction du nombre d'émetteurs dans la zone de détection de son récepteur  $N(R)$ . Il débute ses transmissions pendant

la première  $T_c$  par une puissance initiale  $P_{ini}$  puis il l'augmente ou la baisse d'un échelon  $\Delta$  sans dépasser une puissance maximale  $P_{max}$ . En effet, si  $N(R)$  est supérieur à  $N_r$ , l'émetteur baisse la puissance d'un échelon  $\Delta$ , ceci permet à d'autres voisins de communiquer simultanément. Si  $N(R)$  est inférieur à  $N_r$ , l'émetteur augmente la puissance d'un échelon  $\Delta$  afin d'améliorer le débit utile normalisé du lien T-R. Sinon, T maintient la même puissance émise. Ce processus est répété à chaque période  $T_c$  et jusqu'à la fin de la connexion entre T et R. Le pseudocode algorithmique 4.4 décrit le processus d'adaptation de puissance émise en fonction de la densité de voisinage, où  $P(t.T_c)$  est la puissance émise à la  $t^{ième}$  période  $T_c$  d'un émetteur T.

---

**Algorithme 4.4** Algorithme d'adaptation de la puissance d'émission proposé.

---

**Entrées :**  $N(R)$ ,  $\Delta$ ,  $T_c$ ,  $P_{ini}$ ,  $t$ ;

**Sortie :**  $P_t$ ;

**Si**  $t = 1$  **alors**

$$P_t(1.T_c) = P_{ini};$$

**Sinon**

**Si**  $N(R) > N_r$  **alors**

$$P_t(t.T_c) = P_t((t-1).T_c) - \Delta;$$

**Sinon**

**Si**  $N(R) = N_r$  **alors**

$$P_t(t.T_c) = P_t((t-1).T_c);$$

**Sinon**

$$P_t(t.T_c) = P_t((t-1).T_c) + \Delta;$$

**Fin si**

**Fin si**

**Fin si**

---

### 4.3.2 Protocole MAC proposé

Un nouveau protocole MAC est nécessaire pour gérer conjointement les mécanismes *cross-layer* basés sur la sélection d'antennes émettrices et l'adaptation de puissance émise présentés respectivement aux paragraphes 3.2.1 et 4.3.1. Ce protocole respectera les trois phases présentées au paragraphe 3.3.1 pour gérer les choix d'antennes entre les véhicules : la première phase est destinée à l'échange de la liste AS entre chaque couple émetteur-récepteur et leurs voisins, la seconde phase permet la négociation du nombre d'antennes utilisées par chaque émetteur et la satisfaction de la condition AQR, et la troisième phase est consacrée à la transmission simultanée de données sans interférences. À ces trois phases, nous rajoutons une quatrième phase pour estimer la densité de voisinage de chaque récepteur. Pendant cette étape, chacun émetteur souhaitant continuer à transmettre des données compte le nombre de listes AS à sa disposition pour estimer la densité de voisinage du récepteur. En fonction de cette dernière, chaque émetteur adapte son

niveau de puissance d'émission pour la prochaine période  $T_{c_x}$ , comme décrit dans le pseudocode algorithme 4.4. Nous notons que l'indice  $x$  dans  $T_{c_x}$  correspond à l'identifiant du couple émetteur-récepteur  $T_x-R_x$  car  $T_c$  varie d'un couple à un autre, elle dépend principalement de la vitesse relative du couple  $T_x-R_x$ . Ainsi, la durée autorisée de transmission pendant la troisième phase du protocole n'est pas la même pour tous les couples du réseau. Après la durée autorisée, pour continuer la communication, chaque couple doit attendre jusqu'à ce que tous les autres couples finissent leurs transmissions simultanées. Ensuite, il procède de nouveau à l'échange de la liste AS et la négociation du nombre d'antennes pour continuer à émettre les transmissions simultanées des données. Le pseudocode algorithme 4.5 décrit le déroulement du protocole dans ses quatre phases.

---

**Algorithme 4.5** Algorithme de sélection d'antennes et d'adaptation de puissance d'émission proposé.

---

**Entrée :** VANET ;

**Tant que** les véhicules demandent de transmettre des données **faire**

**Pour tout**  $T_x-R_x$  **faire**

        Phase d'échange de la liste d'antennes AS ;

**Fin pour**

**Pour tout**  $T_x-R_x$  **faire**

**Si** la condition AQR n'est pas satisfaite **alors**

            Phase de négociation ;

**Fin si**

**Fin pour**

**Pour tout**  $T_x-R_x$  **faire**

        Envoyer le paquet CTS ;

**Répéter**

            Transmissions simultanées des données ;

**jusqu'à** la fin de  $T_{c_x}$

        Attendre jusqu'à que tous les émetteurs finissent la phase d'émission des données ;

**Fin pour**

**Pour tout**  $T_x-R_x$  **faire**

$T_x$  estimer la densité de voisinage de  $R_x$  ;

        Adaptation de la puissance émise suivant l'algorithme 4.4 ;

**Fin pour**

**Fin tant que**

---

## 4.4 Résultats de simulation

Pour étudier la solution proposée, nous supposons un réseau VANET aléatoirement distribué sur la grille urbaine de Manhattan de taille 100m × 100m montrée dans figure 4.3. Chaque véhicule se déplace avec une vitesse constante de 40 km/h et tous les véhicules cherchent à émettre ou



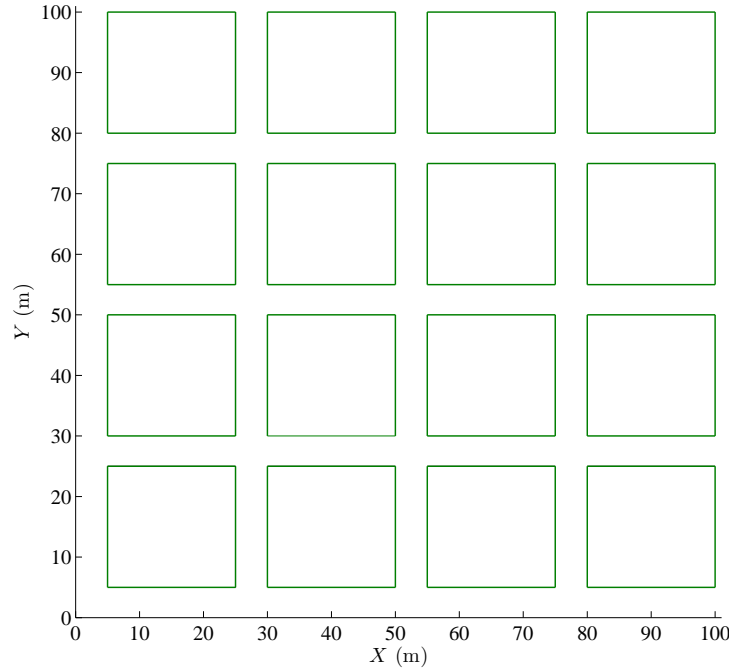


FIGURE 4.3 – Grille de Manhattan.

recevoir des données pendant toute la durée de simulation  $T_{sim}$ . L'affaiblissement de parcours est donné par l'équation (1.7) et les paramètres de simulation utilisés sont présentés dans le tableau 4.2. Nous évaluons les performances de l'architecture proposée en termes de débit utile normalisé DUN en fonction  $\frac{1}{\sigma^2}$  (puisque  $P_t$  est variable), par simulation MATLAB Monte Carlo. Le DUN obtenu est moyenné sur le nombre de simulations et le nombre de liens V2V ( $T_x-R_x$ ), afin d'obtenir un débit utile normalisé et moyenné par chaque lien V2V. Dans la figure 4.4, nous comparons le DUN donné, dans un réseau de 40 véhicules, dans les cas suivants : sans l'algorithme de sélection d'antennes émettrices ASA et sans l'algorithme d'adaptation de puissance d'émission TPA ; avec l'algorithme de sélection d'antennes émettrices ASA et sans l'algorithme d'adaptation de puissance d'émission TPA ; avec l'algorithme de sélection d'antennes émettrices ASA et avec l'algorithme d'adaptation de puissance d'émission TPA. Nous précisons que lorsque l'algorithme TPA n'est pas utilisé, la puissance d'émission est par défaut  $P_{ini} = P_{max}$ . D'abord, pour voir le gain apporté par le *cross-layer* basé sur l'algorithme de sélection d'antennes émettrices ASA, nous comparons le débit utile normalisé obtenu dans le cas sans ASA et sans TPA et le cas avec ASA et sans TPA. Dans le cas avec ASA, quand  $\sigma^2 = -45$  dBm (équivalent à un SNR d'entrée  $\frac{P_t}{\sigma^2} = 75$  dBm) le DUN est cinq fois plus élevé que celui obtenu sans ASA. Cependant, quand  $\sigma^2 = -75$  dBm (équivalent à un SNR d'entrée de 105 dBm) le DUN atteint jusqu'à 25% de gain

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation 2.

Paramètres	Notation	Valeurs
Scénario de simulation		Grille de Manhattan
Zone de simulation		100m×100m
Temps de simulation	$T_{sim}$	50 s
Nombre de simulations		30
Fréquence de la porteuse	$f$	5.9 GHz
Nombre de véhicules		40, 100 véhicules
Vitesse		40 km/h
Configuration du réseau		Single hop
Modèle du canal		Nakagami
Paramètre m-Nakagami		1.5
Longueur du paquet de données	$L_p$	180 symboles
Modulation		BPSK
Protocole de liaison de données		Selective Repeat
Durée de symbole		8 $\mu$ s
Puissance d'émission initiale	$P_{ini}$	30 dBm
Puissance d'émission maximale	$P_{max}$	30 dBm
Échelon d'adaptation de puissance	$\Delta$	5 dBm
Sensibilité du récepteur	$R_s$	-70, -80, -90 dBm
Distance référence	$d_{ref}$	1 m
Puissance reçue de référence	$P_{ref}$	0.0164 mW
Gain d'antennes émettrices	$G_t$	0 dBi
Gain d'antennes réceptrices	$G_r$	0 dBi
Exposant d'affaiblissement de parcours	$\alpha$	3
Nombre d'antennes émettrices	$N_t$	4
Nombre d'antennes réceptrices	$N_r$	4

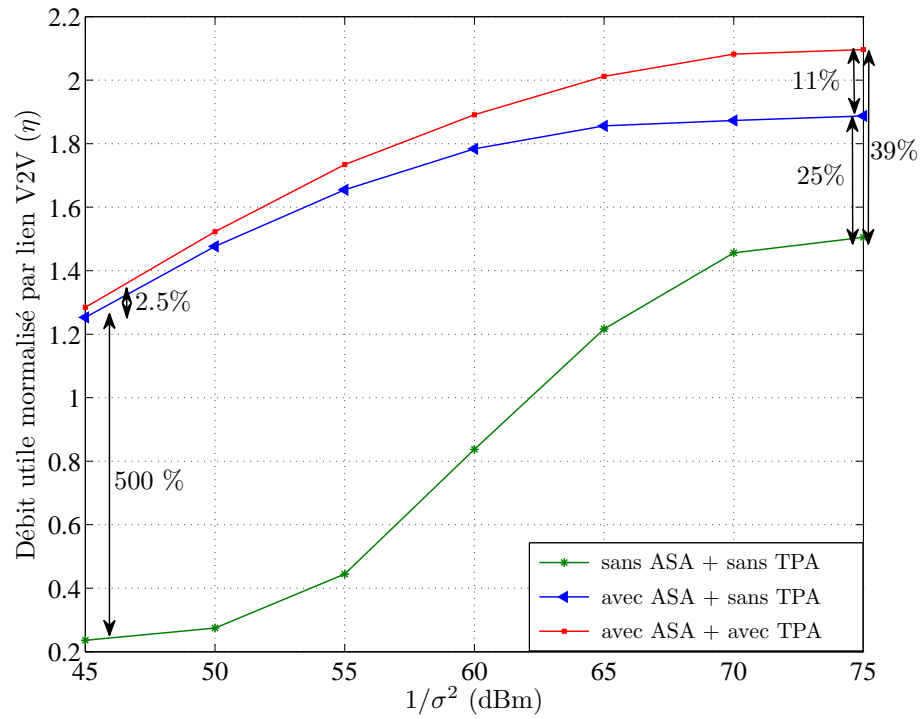


FIGURE 4.4 – Débit utile normalisé par lien V2V dans un réseau de 40 véhicules : sans ASA et sans TPA, avec ASA et sans TPA, avec ASA et avec TPA.

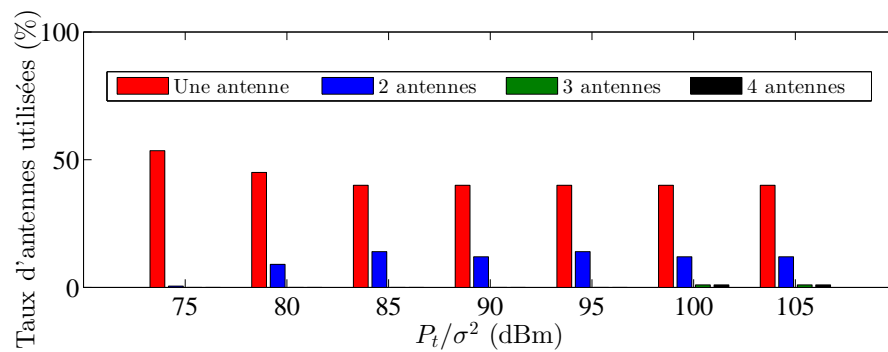


FIGURE 4.5 – Taux d'antennes émettrices sélectionnées dans un réseau de 40 véhicules. Les algorithmes de sélection d'antennes émettrices et d'adaptation de la puissance émise sont appliqués.

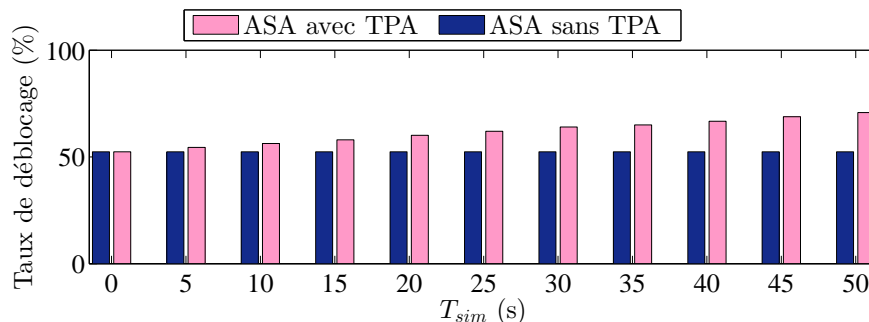


FIGURE 4.6 – Taux de véhicules en transmissions simultanées dans un réseau de 40 véhicules.

par rapport à celui donné sans ASA. Si un véhicule utilise toutes ses antennes émettrices et si le SNR d'entrée est faible, le partage de la puissance d'émission sur toutes les antennes dégrade le débit utile normalisé. Par contre, nous constatons dans la figure 4.5 qu'en appliquant l'algorithme ASA, les véhicules choisissent généralement moins d'antennes. Ceci pour deux raisons : maximiser le débit utile normalisé d'un lien à faible SNR d'entrée ou satisfaire la condition AQR.

Maintenant, afin d'évaluer le gain apporté par la solution *cross-layer* basée sur l'adaptation de la puissance d'émission TPA, nous comparons les DUNs obtenus avec et sans l'algorithme TPA (et dans les deux cas avec sélection d'antennes ASA). Nous constatons que le DUN obtenu avec ASA et avec TPA est le plus élevé, en particulier quand la puissance du bruit est relativement faible. En effet, quand  $\sigma^2 = -75$  dBm, un gain de 11% est observé. Par contre, quand  $\sigma^2 = -45$  dBm (c'est-à-dire quand la qualité de la liaison est médiocre), nous enregistrons un gain modeste de 2.5%. Nous concluons que la diminution de la puissance d'émission pour minimiser les interférences, n'affecte pas le débit utile normalisé de chaque lien V2V, tout en augmentant le débit utile normalisé du réseau du fait du nombre plus élevé de lien V2V simultanés et non interférents qu'elle permet.

Par rapport au cas classique (sans ASA et sans TPA), quand  $\sigma^2 = -75$  dBm, l'amélioration constatée en utilisant l'algorithme ASA et l'algorithme TPA est d'environ 39%, alors qu'elle est d'environ 25% avec uniquement l'algorithme ASA. Donc, le DUN du réseau le plus élevé est donné par ASA et TPA puis uniquement avec ASA et le plus faible est donné dans le cas classique sans les mécanismes ASA et TPA.

La figure 4.6 présente le taux de véhicules en transmission simultanée pendant la durée de simulation  $T_{sim}$  et quand  $\sigma^2 = -75$  dBm. En utilisant les algorithmes ASA et TPA, le taux de véhicules en communication augmente progressivement puis se stabilise à environ 70%. Tandis que le taux donné en utilisant uniquement ASA est quasi-constant aux alentours de 50%. En effet, en utilisant l'algorithme TPA les émetteurs transmettent les données avec la puissance

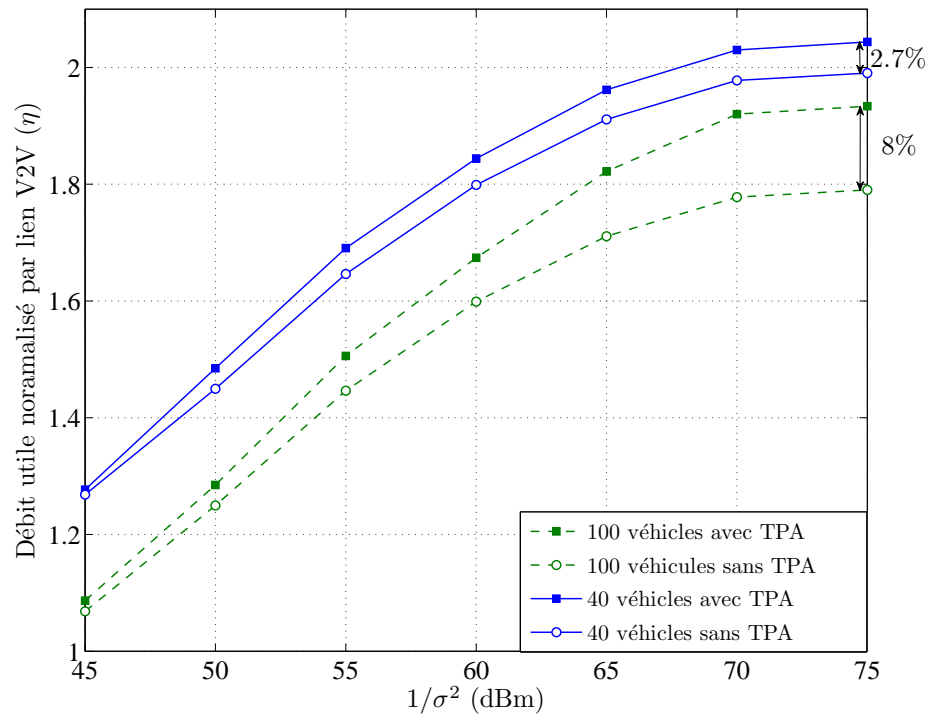


FIGURE 4.7 – Débit utile normalisé par lien V2V dans un réseau de 40 et de 100 véhicules : avec TPA ou sans TPA.

d'émission initiale  $P_{ini} = P_{max}$  puis au cours du temps ils adaptent cette puissance par échelon  $\Delta$  après chaque période  $T_{cx}$ . Donc, au fil du temps les émetteurs trouvent le bon niveau de puissance nécessaire. Nous présentons, à la figure 4.7, le débit utile normalisé par lien V2V, donné dans deux réseaux de densité différentes (40 et 100 véhicules). Comme nous avons pu le constater au paragraphe 3.4.2, le DUN est meilleur dans les réseaux moins denses. En effet, la condition AQR exige que le nombre maximal d'émetteurs dans une zone de détection d'un récepteur soit de  $N_r$ . Or, il est plus fréquent qu'un récepteur ait plus que  $N_r$  émetteurs dans sa zone de détection.

Nous remarquons également une hausse du débit utile normalisé par lien V2V dans les deux réseaux en appliquant l'algorithme TPA. Dans un réseau de 100 véhicules, celui-ci améliore le débit utile normalisé de 8%. Alors que dans un réseau de 40 véhicules, l'algorithme TPA ramène un gain modeste de 2.7%. Nous concluons que le gain apporté par l'algorithme TPA est plus remarquable dans les réseaux à forte densité. Quand l'effet de blocage est très présent l'approche débloque davantage de véhicules. La sensibilité d'un récepteur qui est la puissance de réception minimale requise pour détecter un signal, a une influence directe sur la largeur de la zone de détection d'un récepteur. Dans la figure 4.8, nous étudions les performances de l'architecture

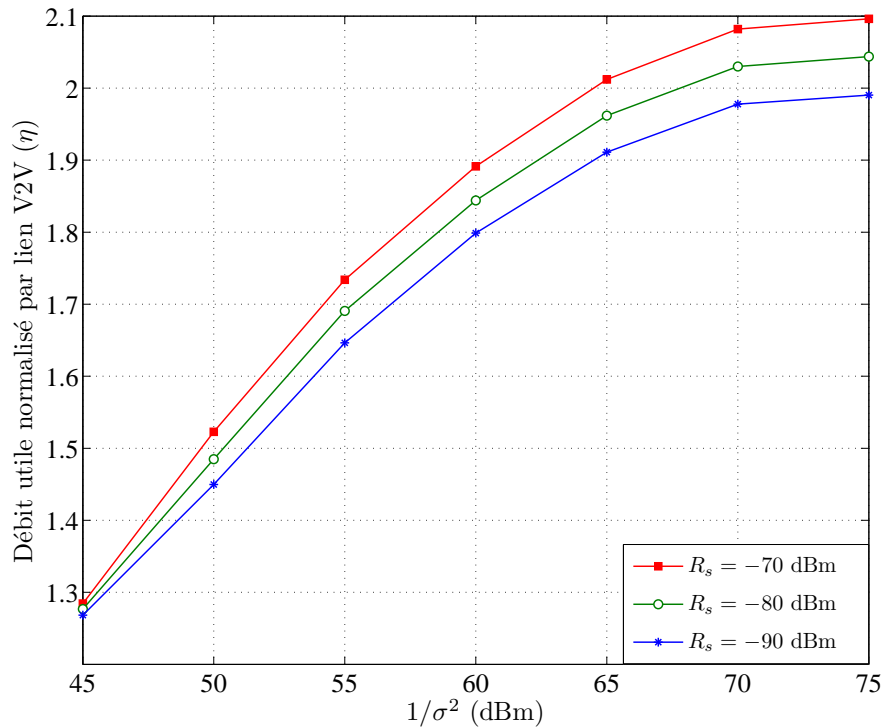


FIGURE 4.8 – Débit utile normalisé dans un réseau de 40 véhicules avec différentes valeurs de sensibilité du récepteur.

ASA avec TPA pour différents niveaux de sensibilité de récepteur ( $R_s = -70, -80$  et  $-90$  dBm). Nous constatons une baisse du débit utile normalisé quand la sensibilité augmente. En effet, l'amélioration de la sensibilité permet au récepteur de détecter des signaux à très faible puissance, cela est dû à la puissance d'émission ou la distance. Le récepteur aura alors plus de véhicules interférents dans sa zone de détection et plus de contraintes pour satisfaire la condition AQR d'où cette baisse de débit utile normalisé. Par conséquent, plus le récepteur est sensible aux faibles signaux plus le problème de blocage de réception persiste.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une solution pour réduire l'effet de blocage de réception dans les réseaux VANETs denses. Cette solution est basée sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices associé à un algorithme d'adaptation de la puissance émise de chaque émetteur en fonction de la densité du voisinage de son récepteur. Comme vu dans chapitre 3, l'algorithme de sélection d'antennes améliore le débit utile normalisé de chaque lien V2V. Associé avec le

détecteur ZF-BLAST, il permet des transmissions simultanées au sein d'une même zone de détection et il minimise ainsi le blocage de réception et améliorer le DUN global du réseau. Dans ce chapitre 4, nous avons joint à la solution précédente un algorithme d'adaptation de la puissance émise afin de réduire le nombre d'émetteurs interférents par zone de détection et ainsi débloquent davantage des véhicules.

Nous avons testé cette architecture par simulation dans différents scénarios de réseaux VANETs, basés sur une grille de Manhattan. Les résultats montrent que le meilleur DUN est donné en association les deux algorithmes ASA et TPA. De plus, le gain en DUN est plus important dans les réseaux plus denses où plus de véhicules ont été débloqués. Nous avons aussi conclu que le DUN est plus élevé si le récepteur est moins sensible aux signaux à faible puissance, c'est-à-dire moins exposé aux interférences des véhicules voisins.





# Conclusion générale et perspectives

---

Le protocole MAC IEEE 802.11p dédié aux réseaux véhiculaires VANETs donne l'accès au canal d'une manière alternative pour éviter les interférences entre voisins. Les véhicules sont interdits de toutes communications pendant une transmission en cours. Cette méthode entraîne un blocage temporaire de réception, ce qui entraîne un effet néfaste sur le débit global du réseau. Nous avons proposé, dans cette thèse, deux solutions pour réduire l'effet de blocage dans les réseaux véhiculaires VANETs.

La première solution est un *cross-layer* PHY/MAC basé sur un algorithme de sélection d'antennes émettrices. Cet algorithme permet à chaque récepteur de choisir la meilleure combinaison d'antennes émettrices en se basant sur une estimation du canal. De plus, les émetteurs sont permis d'initier des données simultanément si le nombre d'antennes émettrices dans chaque zone de détection d'un récepteur ne dépasse pas le nombre d'antennes de ce dernier (la condition AQR). Ceci permet au récepteur de détecter toutes les signaux et ensuite ne garder que ceux de son interlocuteur. Nous associons à cet algorithme un nouveau protocole MAC. Ce protocole se compose de trois phases. La première phase est consacrée à l'échange de choix de listes d'antennes entre les véhicules dans la même zone radio. Puis, la deuxième phase est dédiée à la négociation de nombre d'antennes émettrices utilisées de sorte que la condition AQR soit satisfaite. Finalement, la troisième phase est destinée à la transmission simultanée des données pendant le temps de cohérence du canal débité du temps d'échange de paquets de contrôle.

Nous sommes parvenus avec cette solution proposée à améliorer le débit utile de chaque lien V2V en permettant à chaque récepteur de choisir la meilleure combinaison d'antennes émettrices. Ensuite, nous avons amélioré le débit utile global du réseau en permettant à plusieurs émetteurs de transmettre simultanées des données sans craindre les interférences. Nous avons constaté que cette solution est sensible à l'effet de Doppler dû à la mobilité des véhicules notamment sur les autoroutes. Nous avons également remarqué que le *throughput* est moins important dans les

réseaux VANETs à densité élevée où les chevauchements de zones de transmission et de détection sont plus fréquents c'est-à-dire il y a plus de contraintes pour satisfaire la condition AQR.

Dans la deuxième solution, nous avons optimisé la première approche pour améliorer d'avantage le débit utile dans les réseaux VANETs denses. Nous avons associé à la première approche proposée un *cross-layer* PHY/MAC basé sur l'adaptation de la puissance émise en fonction de la densité de voisinage du récepteur. L'objectif est de réduire les zones d'interférences, minimiser les chevauchements des zones de transmissions et de détections et ainsi libérer le plus de véhicules. Pour gérer l'algorithme d'adaptation de puissance et l'algorithme de sélection d'antennes émettrices, nous avons ajouté au premier protocole MAC une quatrième phase l'estimation de la densité de voisinage du récepteur.

D'abord, nous avons comparé les performances obtenues en termes de débit utile des deux solutions proposées avec des différents scénarios VANETs sur une grille de Manhattan. Nous avons remarqué que le débit utile s'améliore considérablement avec l'algorithme d'adaptation de puissance et que le taux de véhicules débloqués augmente. Ensuite, nous avons testé cette approche avec différentes valeurs de sensibilité du récepteur. Nous avons conclu que le débit utile est plus important, si le récepteur ne détecte pas les signaux à faibles puissances. Dans ce cas, il a moins d'émetteurs potentiels dans sa zone de détection et moins de contraintes pour satisfaire la restriction AQR.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus ouvrent la voie à plusieurs perspectives pour un futur travail :

Nous avons vu que plus la sensibilité du récepteur est faible plus le récepteur subira d'interférences. Il est alors judicieux d'adapter la sensibilité de chaque récepteur par rapport à la puissance du signal reçu. Un récepteur moins sensible aux signaux à faible puissance, il allégera les restrictions pour satisfaire la condition AQR. Il sera alors intéressant d'étudier la solution proposée avec un algorithme d'adaptation de sensibilité de récepteur.

Nous avons testé les approches proposées dans un contexte véhiculaire à un seul saut (*single-hop*), or dans les VANETs la connectivité directe est discontinue due à la mobilité des véhicules. L'information transmise parcourt un chemin à multi-saut (*multi-hop*) pour arriver jusqu'au destinataire. Il est nécessaire alors d'étudier les performances des approches proposées dans un contexte VANET à multi-saut.

Enfin, les performances de nos approches ont été étudiées avec des simulations Monte Carlo avec MATLAB et à l'aide d'un générateur de mobilité véhiculaire SUMO. Il est utile de tester ces études dans des conditions réelles de manière à comparer les performances réelles par rapport à celles obtenues par simulations.

Ce travail sera poursuivi au sein de notre groupe de recherche par A. Triwinarko dans le cadre de sa thèse qui a débuté en novembre 2016.

# Liste de Publications

## Articles dans des journaux internationaux

- Bouraoui B., Gharbi M., Zwingelstein-Colin M., Dayoub I., Attia R., "*A Cross-layer Design Based Antennas Selection for the Receiver Blocking Problem in Vehicular Ad-hoc Networks*", Soumis à Wireless Communication and Mobile Computing.
- Bouraoui B., Zwingelstein-Colin M., Dayoub I., Gharbi M., Attia R., "*Cross-layer Design with Transmit Power Adaptation for the Receiver Blocking Problem in VANETs*", À soumettre en IET Intelligent Transport Systems.

## Articles de conférences internationales avec comité de lecture

- Bouraoui B., Zwingelstein-Colin M., Gharbi M., Dayoub I., Attia R., "*Cross-layer Design Based Transmit Antenna Selection for Vehicular Ad-hoc Networks*", Nets4Cars/Nets4Trains /Nets4Aircraft, Sousse, Tunisia 06-08 Mai 2015.

## Communication orales sans actes

- Bouraoui B., "*Architecture Cross-layer PHY/MAC pour les Réseaux Ad-hoc Véhiculaires VANETs*", Poster, Doctorale de Lille, Marcq en Baroeul, France 20-25 Mars 2016.
- Bouraoui B., Dayoub I., Zwingelstein-Colin M., Gharbi M., Attia R., "*MIMO Cross-layer Design for AD-hoc Networks*", Poster, JFL2, Dunkerque, France 22-25 Octobre 2013.



# Bibliographie

- [1] Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems CVIS. <http://www.cvisproject.org>.
- [2] SAFESPOT. <http://www.safespot-eu.org/>.
- [3] CarCoDe. [http://www.cister.isep.ipp.pt/itea2-carcode/the\\_project.php](http://www.cister.isep.ipp.pt/itea2-carcode/the_project.php).
- [4] Secure Vehicular Communication SeVeCom. <http://www.sevecom.org/>.
- [5] Fan Bai, Tamer Elbatt, Gavin Hollan, Hariharan Krishnan, and Varsha Sadekar. Towards characterizing and classifying communication-based automotive applications from a wireless networking perspective. In *Proceedings of IEEE Workshop on Automotive Networking and Applications (AutoNet)*, pages 1–25, 2006.
- [6] Yacine Khaleda, Manabu Tsukadaa, José Santab, JinHyeock Choia, and Thierry Ernsta. A usage oriented analysis of vehicular networks : from technologies to applications. *Journal of Communications*, 4(5) :357–368, 2009.
- [7] IEEE 802.11p 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 802.11p*, 2010.
- [8] Wei Fang Mao, Walaa Hamouda, and Iyad Dayoub. Performance of MIMO Cross-Layer MAC Protocol Based on Antenna Selection in Ad Hoc Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 12 :652–660, 2010.
- [9] Simulation of Urban MObility. <http://www.dlr.de/>, 2007.
- [10] OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/>.
- [11] International Organization for Standardization. Intelligent transport systems - Communications access for land mobiles (CALM) Architecture. Technical report.
- [12] SafeCOP. <http://www.safecop.eu/>.

- 
- [13] M Sivasakthi and SR Suresh. Research on vehicular ad hoc networks (VANETs) : An Overview. *International Journal of Applied Science and Engineering Research*, 2(1) :23–27, 2013.
- [14] Hannes Hartenstein and Kenneth Laberteaux. *VANET vehicular applications and inter-networking technologies*, volume 1. John Wiley & Sons, 2009.
- [15] Hannes Hartenstein and Kenneth Laberteaux. *VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. John Wiley & Sons, 2009.
- [16] Mohamed Nidhal Mejri, Jalel Ben-Othman, and Mohamed Hamdi. Survey on VANET security challenges and possible cryptographic solutions. *Vehicular Communications*, 1(2) :53–66, 2014.
- [17] ASTM Intl. Standard specification for telecommunications and information exchange between roadside and vehicle systems-5 GHz band Dedicated Short Range Communications (DSRC). *Medium Access Control and Physical Layer specifications*, pages E2213–03, 2003.
- [18] Richard Gilles Engoulou, Martine Bellaïche, Samuel Pierre, and Alejandro Quintero. VANET Security Surveys. *Computer Communications*, 44 :1–13, 2014.
- [19] Christian Maihofer. A Survey of Geocast Routing Protocols. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 6(2) :32–42, 2004.
- [20] IEEE 802.11 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 802.11*, 2007.
- [21] Stephan Eichler. Performance evaluation of the IEEE 802.11p WAVE communication standard. In *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, pages 2199–2203. IEEE, 2007.
- [22] IEEE 1609.1. IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE). Resource Manager, IEEE, 2006.
- [23] IEEE 1609.2. IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE). Security Services for Applications and Management Messages, IEEE, 2006.
- [24] IEEE 1609.3. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE). Networking Services, IEEE, 2010.
- [25] IEEE 1609.4. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)). Multi-channel Operation, IEEE, 2010.
- [26] European Telecommunications Standards Institute ETSI. <https://www.etsi.org/>.
- [27] John B Kenney. Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States. *Proceedings of the IEEE*, 99(7) :1162–1182, 2011.

- [28] Volker Jungnickel, Volker Pohl, S Nonnig, and Clemens Von Helmolt. A Physical Model of the Wireless Infrared Communication Channel. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(3) :631–640, 2002.
- [29] Michel Mouly, Marie-Bernadette Pautet, and Thomas Foreword By-Haug. *The GSM system for mobile communications*. Telecom publishing, 1992.
- [30] Jeffrey G Andrews, Arunabha Ghosh, and Rias Muhamed. *Fundamentals of WiMAX : understanding broadband wireless networking*. Pearson Education, 2007.
- [31] Harald T Friis. A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5) :254–256, 1946.
- [32] John Proakis and Masoud Salehi. *Digital Communications*. 2007.
- [33] Minoru Nakagami. The m-distribution, A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading. *Statistical Method of Radio Propagation*, 1960.
- [34] Marc Torrent-Moreno, Daniel Jiang, and Hannes Hartenstein. Broadcast reception rates and effects of priority access in 802.11-based vehicular ad-hoc networks. pages 10–18, 2004.
- [35] Hervé Boeglen, Benoît Hilt, Pascal Lorenz, Jonathan Ledy, A-M Poussard, and Rodolphe Vauzelle. A survey of V2V channel modeling for VANET simulations. In *Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS), 2011 Eighth International Conference on*, pages 117–123. IEEE, 2011.
- [36] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. [http://http://www.dlr.de](http://www.dlr.de).
- [37] Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing. <http://www.census.gov/geo/www/tiger>.
- [38] Geographic Data Files. <http://www.iso.org>.
- [39] Stefan Krauß. Microscopic modeling of traffic flow. *Investigation of collision free vehicle*, 1998.
- [40] Peter G Gipps. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B : Methodological*, 15(2) :105–111, 1981.
- [41] Daniel Krajzewicz. Kombination von taktischen und strategischen Einflüssen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Technical report, VDI-Verlag, 2009.
- [42] David Chones and Fabián Ernesto Bustamante. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks. In *Proceedings of the Second ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, pages 69–78.
- [43] CANU Mobility Simulation Environment. <http://canu.informatik.uni-stuttgart.de/mobisim>.



- [44] Marco Fiore, Jerome Harri, Fethi Filali, and Christian Bonnet. Vehicular mobility simulation for VANETs. In *Simulation Symposium, 2007. ANSS'07. 40th Annual*, pages 301–309. IEEE, 2007.
- [45] Bryan Raney, Andreas Voellmy, Nurhan Cetin, Milenko Vrtic, and Kai Nagel. Towards a microscopic traffic simulation of all of Switzerland. In *Computational Science ?ICCS 2002*, pages 371–380. Springer, 2002.
- [46] UDel Models. UDel Models For Simulation of Urban Mobile Wireless Networks. <http://udelmodels.eecis.udel.edu/>, 2007.
- [47] Stephan Eichler, Benedikt Ostermaier, Christoph Schroth, and Timo Kosch. Simulation of car-to-car messaging : Analyzing the impact on road traffic. In *null*, pages 507–510. IEEE, 2005.
- [48] Environmental Systems Research Institute. <http://www.esri.com>.
- [49] The Mathworks MATLAB. <https://www.mathworks.com/>.
- [50] Basma Bouraoui, Marie Zwingelstein-Colin, Mohamed Gharbi, Iyad Dayoub, and Rabah Attia. Cross-Layer Design Based Transmit Antenna Selection for Vehicular Ad-hoc Networks. *Nets4Cars/Nets4Trains/Nets4Aircraft Sousse, Tunisia*, pages 24–34, 2015.
- [51] Mario Gerla, Biao Zhou, Yeng-Zhong Lee, Fabio Soldo, Uichin Lee, and Gustavo Marfia. Vehicular grid communications : the role of the internet infrastructure. In *Proceedings of the 2nd annual international workshop on Wireless internet*, page 19. ACM, 2006.
- [52] Kahina Ait Ali. *Modélisation et étude de performances des réseaux VANET*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2012.
- [53] Francisco J Martinez, J-C Cano, Carlos T Calafate, and Pietro Manzoni. Citymob : A Mobility Model Pattern Generator for VANETs. In *ICC Workshops-2008 IEEE International Conference on Communications Workshops*, pages 370–374. IEEE, 2008.
- [54] Francisco J Martinez, Chai Keong Toh, Juan-Carlos Cano, Carlos T Calafate, and Pietro Manzoni. A Survey and Comparative Study of Simulators for Vehicular Ad hoc Networks (VANETs). *Wireless Communications and Mobile Computing*, 11(7) :813–828, 2011.
- [55] Muhammad Alam, Muhammad Sher, and Syed Afaq Husain. Integrated Mobility Model (IMM) for VANETs Simulation and its Impact. In *Emerging Technologies, 2009. ICET 2009. International Conference on*, pages 452–456. IEEE, 2009.
- [56] Omid Abedi, Reza Berangi, and M Abdollahi Azgomi. Improving route stability and overhead on AODV routing protocol and make it usable for VANET. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2009. ICDCS Workshops' 09. 29th IEEE International Conference on*, pages 464–467. IEEE, 2009.

- [57] B Ramakrishnan, RS Rajesh, and RS Shaji. CBVANET : A cluster based vehicular adhoc network model for simple highway communication. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, 2(4) :755–761, 2011.
- [58] Jerry R Hampton. *Introduction to MIMO communications*. Cambridge University Press, 2013.
- [59] Alex B Gershman and Nikos D Sidiropoulos. *Space-time processing for MIMO communications*. Wiley Online Library, 2005.
- [60] Bhaskar Krishnamachari. *Networking wireless sensors*. Cambridge University Press, 2005.
- [61] Vijay Madisetti. *Digital signal processing fundamentals*. CRC press, 2009.
- [62] KVKK Prasad. *Principles of Digital Communication System & Computer Network*. Dreamtech Press, 2003.
- [63] Halid Hrasnica, Abdelfatteh Haidine, and Ralf Lehnert. *Broadband powerline communications : network design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [64] Bhaskar Krishnamachari. *Networking wireless sensors*. Cambridge University Press, 2005.
- [65] Rola Naja et al. *Wireless vehicular networks for car collision avoidance*, volume 2013. Springer, 2013.
- [66] Kaveh Ghaboosi, Matti Latva-aho, and Yang Xiao. Receiver blocking problem in mobile ad hoc networks : Challenges & solutions. In *2008 1st IFIP Wireless Days*, pages 1–5. IEEE, 2008.
- [67] Hongqiang Zhai, Jianfeng Wang, and Yuguang Fang. DUCHA : A New Dual-Channel MAC Protocol for Multihop Ad Hoc Networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 5(11) :3224–3233, 2006.
- [68] Shih-Lin Wu, Chih-Yu Lin, Yu-Chee Tseng, and Jang-Laing Sheu. A new multi-channel mac protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks. In *Parallel Architectures, Algorithms and Networks, 2000. I-SPAN 2000. Proceedings. International Symposium on*, pages 232–237. IEEE, 2000.
- [69] Arvind Swaminathan, Daniel L. Noneaker, and Harlan B. Russell. The Receiver Blocking Problem in a DS Mobile Ad Hoc Network with Directional Antennas. In *Military Communications Conference, 2004. MILCOM 2004. 2004 IEEE*, volume 2, pages 920–926. IEEE, 2004.
- [70] Wei Fang Mao, Walaa Hamouda, and Iyad Dayoub. MIMO Cross-Layer Design for Ad-hoc Networks. *IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 652–660, 2010.
- [71] Alberto Leon-Garcia and Indra Widjaja. *Communications Networks*. McGraw-Hill, 2000.

- 
- [72] Ryan Parker and Shahrokh Valaee. Vehicular node localization using received-signal-strength indicator. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(6) :3371–3380, 2007.
- [73] Andrés Felipe Acosta, Jorge Ernesto Espinosa, and Jairo Jose Espinosa. *Modeling Mobility with Open Data*, chapter TraCI4Matlab : Enabling the Integration of the SUMO Road Traffic Simulator and Matlab® Through a Software Re-engineering Process, pages 155–170. Springer International Publishing, 2014.
- [74] Danda Beer Rawat, Gongjun Yan, Dimitrie Popoescu, Michele Weigle, and Stephan Olariu. Dynamic Adaptation of Joint Transmission Power and Contention Window in VANET. *IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall(VTC 2009-Fall)*, pages 1–5, 2009.
- [75] Maen M Artimy, William Robertson, and William J Phillips. Assignment of Dynamic Transmission Range Based on Estimation of Vehicle Density. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 40–48. ACM, 2005.
- [76] Giuseppe Caizzone, Paolo Giacomazzi, Luigi Musumeci, and Giacomo Verticale. A Power Control Algorithm with High Channel Availability for Vehicle Ad hoc Networks. *IEEE International Conference on Communications*, 5 :3171–3176, 2005.
- [77] Ram Ramanathan and Regina Rosales-Hain. Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment. 2 :404–413, 2000.