



HAL
open science

Modélisation et étude de performances dans les réseaux VANET

Kahina Ait Ali

► **To cite this version:**

Kahina Ait Ali. Modélisation et étude de performances dans les réseaux VANET. Ordinateur et société [cs.CY]. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2012. Français. NNT : 2012BELF0185 . tel-00827552

HAL Id: tel-00827552

<https://theses.hal.science/tel-00827552>

Submitted on 29 May 2013

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.

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

MODÉLISATION ET ÉTUDE DE
PERFORMANCES DANS LES RÉSEAUX
VANET

■ Kahina AIT ALI

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

N° X | X | X

THÈSE présentée par

Kahina AIT ALI

pour obtenir le

Grade de Docteur de

l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Informatique**

MODÉLISATION ET ÉTUDE DE PERFORMANCES DANS LES RÉSEAUX VANET

Soutenue le Mardi 16 Octobre 2012 devant le Jury :

André-Luc BEYLOT	Rapporteur	Professeur à l'Université de Toulouse
Thomas NOEL	Rapporteur	Professeur à l'Université de Strasbourg
Dominique GAITI	Président	Professeur à l'UTT
Nadine MALHOUROUX	Examineur	Chercheur sénior à Orange Labs Belfort
Alexandre CAMINADA	Directeur de thèse	Professeur à l'UTBM
Oumaya BAALA	Co-encadrant	Maitre de conférences à l'UTBM

Je dédie ce travail à mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu.

Remerciements

Je tiens à adresser en premier lieu mes remerciements et ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Alexandre CAMINADA pour m'avoir permis d'intégrer son équipe au sein du laboratoire Systèmes et Transport et avoir dirigé mes travaux de thèse. Je le remercie très sincèrement pour son encadrement, son soutien, son aide précieuse et sa confiance sans lesquels ce travail n'aurait pas été ce qu'il est.

Mes remerciements s'adressent également à Oumaya Baala pour avoir co-dirigé ce travail, pour ses critiques et précieux conseils, pour sa confiance et sa disponibilité.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Je remercie Monsieur BEYLOT André-Luc, Professeur à l'Université de Toulouse et Monsieur NOEL Thomas, Professeur à l'Université de Strasbourg, de m'avoir honoré en acceptant la charge de travail qu'implique la lecture critique de ce manuscrit. Leurs nombreux commentaires et remarques pertinentes m'ont amené à de nouvelles pistes de réflexions et perspectives de recherche. Je remercie également Madame GAITI Dominique, Professeur à l'Université de technologie de Troyes pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury. Je remercie également Madame MALHOUROUX-GAFFET Nadine, Docteur à Orange Labs de Belfort pour l'intérêt qu'elle a porté à mon travail, pour ses remarques très pertinentes et constructives et pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie, de façon plus générale, tous les membres de notre équipe avec qui j'ai pu échanger et travailler ; tout spécialement Laurant Moalic, Mustapha Oughdi, Alexandre Gondran et Joumaa Chibli.

Résumé

Depuis leur apparition, les VANET (*Vehicular Ad hoc Network*) ont connu un très grand essor, de nombreux standards, applications et mécanismes de routage ont été proposés pour répondre aux spécificités de cette nouvelle classe de réseaux. Les défis à relever pour leur conception découlent principalement de la forte mobilité des véhicules, de la diversité spatio-temporelle de la densité du trafic et de la propagation des ondes radio en environnement extérieur défavorable à l'établissement des communications sans fil.

La difficulté, aussi bien économique que logistique, de la mise en œuvre réelle des réseaux véhiculaires fait de la simulation le moyen le plus largement utilisé pour la conception et l'évaluation des solutions proposées. Cependant, la validité des résultats de simulation dépend fortement de la capacité des modèles utilisés à reproduire le plus fidèlement possible les situations réelles. Deux aspects sont essentiellement importants dans les VANET : la mobilité des véhicules et la propagation des ondes radio.

Nous proposons dans cette thèse un nouveau modèle de mobilité et un nouveau modèle de propagation d'ondes radio pour réseaux de véhicules en environnement urbain et suburbain. Pour définir des schémas réalistes, ces deux modèles se basent sur des données statiques et dynamiques réelles décrivant les caractéristiques topographiques et socio-économiques de l'environnement. Ces données concernent particulièrement la distribution spatio-temporelle des véhicules et les infrastructures présentes dans l'environnement. Trois cas d'études sont présentés dans la thèse pour la validation des modèles développés ; un environnement théorique, urbain ou suburbain, défini par l'utilisateur, notamment la grille de Manhattan très utilisée, et deux environnements réels qui représentent des agglomérations de taille moyenne.

Une autre contribution de cette thèse est l'étude de la connectivité radio et des performances des protocoles de routage dans les VANET. A partir de graphes dynamiques de connexions représentant la variation des liens radio entre véhicules en déplacement, nous avons analysé et déterminé les propriétés de la topologie des liaisons radio des réseaux véhiculaires. Pour étudier les protocoles de routage, nous avons utilisé le modèle de mobilité et le modèle de propagation radio que nous avons développés en association avec le simulateur de réseaux ns-2. Nous avons comparé les performances des protocoles de routage les plus répandus et identifié les mécanismes de routage les plus adaptés aux réseaux véhiculaires.

Mots clés : VANET, Modèles de mobilité, Modèles de propagation radio, Graphes de connectivité radio, Routage.

Abstract

Since their appearance, the VANET have been greatly developed ; many standards, applications and routing mechanisms have been proposed to address the specifics of this new class of networks. The challenges arise mainly from the high vehicles mobility, the spatiotemporal diversity of traffic density and, the radio waves propagation in external environment unfavorable to wireless communications establishment.

The difficulty, both economic and logistical, of a real implementation of vehicular networks makes the simulation widely used to conceive and assess the proposed solutions. The validity of simulation results depends strongly on the ability of the models to reproduce as faithfully as possible the real situations. Two aspects are mainly important in the VANET : the simulation of vehicles mobility and radio wave propagation.

We propose in this thesis a new mobility model and a new radio propagation model for vehicular networks in urban and suburban environment. To be realistic, these two models are based on real static and dynamic data describing the topographic and socioeconomic characteristics of the environment. These data concern particularly the spatiotemporal vehicles distribution and the description of the infrastructures present in the environment. Three case studies are presented in the thesis to validate the models, a theoretical user-defined urban or suburban environment (the Manhattan grid very often used) and two real environments from mean size cities.

Another contribution of this thesis is the study of radio connectivity and performance of routing protocols in the VANET. From dynamic graphs representing the variation of the radio links between vehicles in motion, we have analyzed and determined the topology properties of vehicular networks. To study routing protocols, we used the mobility model and the radio propagation model in association with the network simulator ns-2. We have compared the performance of the widespread routing protocols and identified the most adapted routing mechanisms to vehicular networks.

Keywords : VANET, Mobility models, Radio propagation models, Radio connectivity graphs, Routing.

Table des matières

Introduction générale	1
1 État de l’art de la simulation des réseaux véhiculaires	7
1.1 Vue d’ensemble des réseaux véhiculaires	8
1.1.1 Types d’applications	8
1.1.2 Caractéristiques et défis	9
1.1.3 Architectures de communication	11
1.1.4 Activités de standardisation	13
1.1.5 Projets de recherche	17
1.2 Simulation des MANET	20
1.2.1 Modélisation des couches protocolaires	20
1.2.2 Modélisation du comportement	21
1.3 Simulation de la mobilité dans les VANET	22
1.3.1 Approches de modélisation	22
1.3.2 Blocs fonctionnels d’un modèle de mobilité	24
1.3.3 Modèles de mobilité pour VANET	26
1.4 Simulation de la propagation radio dans les environnements véhiculaires	33
1.4.1 Modèles communément utilisés	33
1.4.2 Modèles d’affaiblissement de trajet pour VANET	36
1.5 Vue d’ensemble des simulateurs de VANET	43
1.6 Synthèse	46
2 Modèle de mobilité pour les réseaux véhiculaires	49
2.1 Le modèle MBMM	50
2.1.1 Caractérisation de l’environnement	50
2.1.2 Principe du modèle	51
2.1.3 Application aux véhicules	55
2.2 Le modèle V-MBMM	57
2.2.1 Principaux mécanismes	58
2.2.2 Régulation de la vitesse	68

2.2.3	Changement de voie	69
2.2.4	Synthèse des paramètres	70
2.3	Cas d'étude du modèle V-MBMM	71
2.3.1	Mobilité théorique en environnement simple	71
2.3.2	Mobilité basée sur les traces : cas de la CAB	72
2.3.3	Mobilité basée sur les enquêtes : cas de la CASQY	76
2.4	Validation du modèle V-MBMM	79
2.4.1	Analyse des mécanismes de base	79
2.4.2	Analyse de la répartition de la population vs. l'attractivité des lieux	86
2.4.3	Analyse des activités journalières	90
2.5	Synthèse	92
3	Propagation et connectivité radio dans les VANET	97
3.1	Le modèle ERCEG	98
3.2	Modèle de propagation pour VANET	100
3.2.1	Description du modèle	101
3.2.2	Validation du modèle	105
3.3	Connectivité radio dans les VANET	110
3.3.1	Modélisation et caractérisation de la connectivité	113
3.3.2	Analyse des résultats	120
3.4	Conclusion	127
4	Protocoles et mécanismes de routage dans les VANET	129
4.1	Routage dans les VANET	130
4.1.1	AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) [Perkins <i>et al.</i> , 2003]	132
4.1.2	DSR (Dynamic Source Routing) [Johnson <i>et al.</i> , 2003]	133
4.1.3	OLSR (Optimized Link State Routing) [Clausen & Jacquet, 2003]	133
4.2	Architecture générale du système	134
4.2.1	Contexte de l'étude	134
4.2.2	Simulation du réseau	136
4.3	Simulations et résultats	140
4.3.1	Paramètres de simulation	140
4.3.2	Motifs des pertes de paquets	142
4.3.3	Taux d'identification des routes	143
4.3.4	Charge en paquets de contrôle	146
4.3.5	Taux de réception des paquets	147
4.3.6	Nombre de sauts	149
4.3.7	Délai de bout-en-bout	150
4.3.8	Synthèse	150

4.4	Dissémination d'informations sur un service d'alerte	152
4.5	Conclusion	154
	Conclusion et perspectives	157
	Publications	163

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques des premiers modèles de mobilité pour véhicules.	27
1.2	Comparaison des contraintes de mouvement des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.	32
1.3	Comparaison des générateurs de trafic des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.	32
1.4	Quelques valeurs typiques de l'exposant path loss du modèle Shadowing, β	34
1.5	Quelques valeurs typiques de la variance du modèle Shadowing, σ_{dB}	35
1.6	Valeurs des paramètres du modèle du path loss, [Kunisch et al. 2008].	41
1.7	Valeurs des paramètres du modèle du path loss, [Grau <i>et al.</i> , 2009].	42
1.8	Valeurs des paramètres du modèle du path loss, [Karedal et al. 2011].	43
2.1	Exemple de classes de terrain.	50
2.2	Données utilisées dans le modèle MBMM.	52
2.3	Coefficients vitesse et déplacements autorisés : Cas véhicules	54
2.4	Valeurs par défaut des attributs des routes.	59
2.5	Exemple d'activités (Structure origine, Structure destination).	60
2.6	Périodes et activités par période d'un jour travaillé.	61
2.7	Mobilité par activité par période.	62
2.8	Paramètres du modèle de mobilité V-MBMM.	70
2.9	Attractivité des structures en fonction des activités qu'elles représentent.	75
2.10	Valeurs des paramètres de simulation - validation mécanismes V-MBMM.	80
2.11	Caractéristiques des routes des environnements simulés.	81
2.12	Valeurs des paramètres de simulation - tests 2.	83
2.13	Caractéristiques des trajectoires obtenues avec les algorithmes CC, PAP et HYB.	86
2.14	Différence des taux entre attractivité et présence des véhicules dans tout le territoire.	89
2.15	Différence des taux entre attractivité et présence des véhicules dans les zones à moyenne et faible attractivité.	89

2.16	Comparaison des caractéristiques des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.	94
2.17	Comparaison des générateurs de trafic des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.	95
3.1	Valeurs des paramètres du modèle Erceg	100
3.2	Paramètres de l'environnement dans les modèles ERCEG et V-PROPAG. . .	102
3.3	Valeurs des paramètres du modèle V-PROPAG	104
3.4	Paramètres de simulation pour l'étude de la connectivité.	120
4.1	Récapitulatif des travaux sur les performances du routage dans les VANET.	136
4.2	Prise en compte des caractéristiques des VANET dans l'étude des perfor- mances des protocoles de routage.	140
4.3	Paramètres de simulation dans ns-2.	141
4.4	Paramètres de simulation V-MBMM et V-PROPAG.	141
4.5	Taux de perte de paquets dues à NRTE et IFQ.	143

Table des figures

1.1	Technologies de communication dans les réseaux véhiculaires.	11
1.2	Allocation des fréquences DSRC en Amérique du Nord et en Europe.	14
1.3	WAVE On Board Unit.	15
1.4	WAVE RoadSide Unit.	15
1.5	Architecture protocolaire du système WAVE [Uzcategui & Acosta-Marum, 2009].	16
1.6	Blocs fonctionnels d'un modèle de mobilité.	25
1.7	Topologie de routes Manhattan communément considérée dans le calcul du path loss.	36
1.8	Relation entre l'angle θ et les pertes de propagation [Oishi <i>et al.</i> , 2006].	38
1.9	Refléxions-diffractions du signal prises en charge dans CORNER.	39
2.1	Directions de déplacements possibles dans le masque.	52
2.2	Coefficients vitesse dans MBMM : cas véhicules.	54
2.3	Anomalies du modèle MBMM dans le cas des véhicules.	56
2.4	Parties données et traitements du modèle V-MBMM.	58
2.5	Matrice flux de déplacement par activité par quart d'heure.	62
2.6	Intérêt du coefficient d'avancement dans V-MBMM.	65
2.7	Topologies de routes simples.	72
2.8	Topologie des routes du centre ville de Belfort.	73
2.9	Classification du terrain du centre ville de Belfort.	73
2.10	Cartographie de l'attractivité du centre ville de Belfort à 14h00.	74
2.11	Cartographie de l'attractivité du centre ville de Belfort à 20h00.	74
2.12	Classification du terrain de la CASQY.	77
2.13	Cartographie de l'attractivité de la CASQY à 8h00.	78
2.14	Cartographie de l'attractivité de la CASQY à 12h00.	78
2.15	Topologie de routes dans la CASQY.	79
2.16	Vitesse moyenne vs. Nombre de véhicules (routes à deux voies).	81
2.17	Vitesse moyenne vs. Nombre de véhicules (routes à six voies).	82
2.18	Vitesse moyenne vs. Durée des feux.	83

2.19	Variation vitesse moyenne vs. Variation de la durée des feux.	83
2.20	Vitesse moyenne vs. Vitesses minimales et maximales des véhicules.	85
2.21	Variation vitesse moyenne vs. variation vitesses minimales et maximales des véhicules.	85
2.22	Répartition de la population sur les zones du territoire.	87
2.23	Répartition de la population sur les zones à moyenne et à faible attractivité du territoire.	88
2.24	Répartition de la population dans la CAB.	89
2.25	Flux de déplacements réels vs. Flux de déplacements simulés.	90
2.26	Flux de déplacements réels vs. Flux de déplacements simulés.	91
2.27	Flux de déplacement entrants.	91
2.28	Flux de déplacement sortants.	92
3.1	Variation du path loss en fonction de la distance - V-PROPAG.	106
3.2	Variation du path loss en fonction de la distance - ERCEG.	106
3.3	Variation du path loss en fonction de la hauteur des antennes - V-PROPAG.	107
3.4	Variation du path loss en fonction de la hauteur des antennes - ERCEG.	108
3.5	Puissance reçue : grilles Manhattan homogènes (a) et mixtes (b).	108
3.6	Nombre moyen de mailles couvertes et rayons moyens : grilles Manhattan à terrains homogènes et mixtes.	109
3.7	Nombre moyen de mailles couvertes et rayons moyens vs. altitude du terrain.	110
3.8	Architecture modulaire pour l'analyse de la connectivité radio.	113
3.9	Exemple de trajectoires générées par le module mobilité.	114
3.10	Couvertures radio générées par le module propagation radio.	115
3.11	Graphes de connectivité de 100 véhicules : Cas Two-Ray Ground.	117
3.12	Graphes de connectivité de 100 véhicules : Cas V-PROPAG.	117
3.13	Zones de couverture de 200 véhicules circulant au centre ville de Belfort.	121
3.14	Graphe de connectivité entre 200 véhicules circulant dans le centre ville de Belfort.	121
3.15	Degré de connectivité des nœuds.	122
3.16	Durée des liens radio entre nœuds.	123
3.17	Partitionnement du réseau en groupes d'au moins 2 nœuds.	124
3.18	Aspect temporel et connectivité radio - V-PROPAG.	125
3.19	Aspect temporel et connectivité radio - TRG.	127
4.1	Composantes du simulateur VANET.	138
4.2	Taux de routes découvertes par chacun des protocoles avec V-PROPAG (colonne gauche) et TRG (colonne droite) - Critère à maximiser.	145
4.3	Trafic de contrôle généré dans le réseau - Critère à minimiser.	146

4.4	Taux de réception de données - Critère à maximiser.	148
4.5	Nombre moyen de sauts.	149
4.6	Délai moyen de bout-en-bout - Critère à minimiser.	151
4.7	Performances de l'application "Alerte d'un accident" avec les modèles V-PROPAG et TRG.	154

Introduction générale

De nos jours, de plus en plus de foyers possèdent au moins un véhicule. Cette situation a conduit à une croissance du trafic routier qui a fortement aggravé le problème de congestion des systèmes de transport et a créé un risque significatif pour la sécurité des personnes. En effet, la circulation en voiture est devenue dans certaines villes, telles Moscou, Pékin ou encore Mexico, une épreuve quotidienne à cause des embouteillages. A Moscou par exemple, il y a en moyenne plus de deux heures d'embouteillage par jour. Un problème encore plus important est celui de la sécurité routière. Les résultats de l'enquête menée par l'OMS (*Organisation Mondiale pour la Santé*) en 2008, sur la prévention des accidents de la circulation, ont révélé que les accidents de route provoquent chaque année plus de 1,2 million de décès et entre 20 à 50 millions de traumatismes non mortels.

De très nombreuses initiatives ont été prises par les gouvernements, les associations et les constructeurs automobiles pour améliorer la sécurité routière et résoudre les problèmes de circulation. Parmi ces initiatives, les campagnes de sensibilisation et de prévention routière, les sanctions aux violations du code de la route qui deviennent de plus en plus sévères, l'intégration des moyens de protection à bord des véhicules, l'amélioration des infrastructures routières ainsi que l'augmentation et l'amélioration, de l'offre de transports en commun. Une autre solution parue dès le début des années 1990 est celle des Systèmes de Transport Intelligent (STI) (ou ITS pour *Intelligent Transportation Systems*). Ces systèmes consistent en l'intégration des technologies de l'information et de la communication aux infrastructures de transport et aux véhicules dans le but de partager les informations permettant d'améliorer l'efficacité des systèmes de transport, la sécurité et le confort des usagers. Les STI reposent sur des systèmes de collecte, de traitement et de diffusion de l'information et proposent divers services qui vont des applications basiques telles la gestion des feux de signalisation, les panneaux à messages dynamiques, à des applications plus élaborées comme le paiement électronique, la gestion du trafic, l'information aux conducteurs et la gestion des urgences.

Durant ces deux dernières décennies, plusieurs pays se sont investis dans des projets pour le déploiement des STI. Dans le domaine de la communication, notamment la communication sans fil, il s'agit d'exploiter des technologies existantes et de définir de nou-

velles technologies pour assurer les échanges d'informations entre les différentes entités qui composent le système. Le WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), les réseaux cellulaires et les réseaux satellitaires sont proposés pour assurer les communications à longue portée et permettre des services tels que la surveillance de l'état du véhicule, la localisation des véhicules, la diffusion des messages d'urgence et l'information sur le trafic. En 2002, une nouvelle technologie de communication, dédiée spécifiquement aux STI, a émergé. Cette technologie, nommée DSRC pour *Dedicated Short Range Communications*, supporte les communications à moyenne et à courte portée qui peuvent être de véhicules-à-infrastructure (V2I *Vehicle-to-Infrastructure*) ou en mode ad hoc de véhicule-à-véhicule (V2V *Vehicle-to-Vehicle* ou VANET pour *Vehicular Ad hoc Network*).

L'intérêt que représentent les réseaux véhiculaires pour les systèmes de transport encourage de plus en plus les organismes de normalisation, le monde académique et les industries à œuvrer pour la définition et le développement de solutions et standards qui répondent aux spécificités de cette classe de réseaux. Les enjeux sont multiples et concernent : l'introduction sur le marché, la qualité de service, la sécurité des données, le passage à l'échelle, l'interopérabilité, l'accès efficace au canal radio, le routage et la dissémination de messages, etc. Il y a énormément de verrous scientifiques, techniques et économiques à lever.

Toute nouvelle solution passe par un processus d'évaluation et de validation avant son éventuel déploiement. Le moyen idéal de réaliser cette tâche est de pouvoir effectuer des tests dans des environnements réels. Cependant, de part la nature distribuée, l'environnement et la topologie complexe des réseaux véhiculaires, une mise en œuvre réelle peut être difficile aussi bien sur le plan économique que logistique. Pour contourner ce problème, la simulation est le moyen le plus largement utilisé. En effet, il est plus facile et moins cher, par le biais de la simulation, de concevoir, d'analyser et d'évaluer les performances de toute solution. Un paramétrage approprié permet de reproduire les différents scénarios de l'environnement et d'analyser leur impact sur les protocoles et applications développés.

La validité des résultats d'une simulation dépend fortement de la capacité du simulateur à reproduire les principales caractéristiques du réseau et à refléter le comportement des entités qui le composent. Le développement de modèles de simulation, qui répondent à ces objectifs, constitue le premier apport de cette thèse. Nous nous intéressons aux deux principaux éléments différenciateurs des réseaux véhiculaires des autres réseaux sans fil : la mobilité des véhicules et la propagation des signaux radio. Ces deux éléments définissent la topologie du réseau et sa variation dans le temps. Le modèle de mobilité détermine la configuration à tout instant du trafic et le modèle de propagation indique la possibilité ou non de liaison radio entre véhicules.

Les déplacements de véhicules ne peuvent pas être représentés par des modèles simples.

Le comportement des conducteurs est régi par divers paramètres dont les caractéristiques des routes, les règles de circulation et les stimulus de l'environnement externe qui influencent la distribution spatiale et temporelle des véhicules. L'impact de ces paramètres sur le comportement des conducteurs doit être reproduit le plus fidèlement possible par les modèles de mobilité. C'est l'objectif du modèle de mobilité que nous proposons dans cette thèse. En plus de la prise en compte des critères déjà considérés dans les modèles de la littérature, notre modèle utilise des informations géographiques et socioéconomiques sur les caractéristiques variables des infrastructures de l'environnement et sur les habitudes des individus, permettant de définir des schémas de mobilité les plus réalistes.

La modélisation de la propagation radio n'a pas suscité autant d'intérêt que celle de la mobilité. Les signaux transmis par les véhicules se propagent en environnement externe et sont dégradés par plusieurs obstacles dont l'effet est difficile à maîtriser. Dans cette thèse nous traitons la modélisation de l'affaiblissement de trajet (*path loss*) dans les réseaux véhiculaires. Très peu de travaux ont été réalisés dans ce contexte, la plupart s'appuient sur l'hypothèse simplifiée d'un environnement ouvert sans obstacle. Ils représentent l'affaiblissement par le modèle *free space* ou *two-ray ground*. Même les modèles qui prennent en compte l'effet des obstacles dans la prédiction de l'affaiblissement utilisent en général un simple paramètre dont la valeur détermine le niveau de l'atténuation du signal. Cette valeur est définie en fonction du type de l'environnement qui peut être rural, urbain, suburbain ou autoroutier. Ces modèles supposent que la dégradation que subissent les signaux ne dépend que du type de l'environnement et qu'elle est identique dans tous les lieux correspondant à cet environnement. Pour la prédiction de l'affaiblissement, le modèle de propagation radio que nous proposons dans cette thèse s'appuie sur des données précises concernant les caractéristiques du terrain dans lequel se propagent les signaux. L'affaiblissement d'un signal transmis par un véhicule à destination d'un autre véhicule est calculé non pas en fonction du type de l'environnement mais en fonction du type et de la densité des obstacles situés entre les deux véhicules. L'utilisation d'informations plus précises conduit à des résultats plus proches de la réalité.

Le deuxième apport de cette thèse est l'étude et l'analyse de la connectivité radio dans le cas particulier des réseaux véhiculaires ad hoc (VANET). La conception et la mise en œuvre de protocoles et solutions adaptés pour les VANET posent de nombreux défis déjà connus dans les réseaux mobiles traditionnels mais qui sont accentués dans les VANET en raison de leur caractéristiques et comportement particuliers. En effet les VANET sont des réseaux très dynamiques, à environnement obstrué, à densité variable du trafic qui peut être forte dans certaines situations (heures de pointe) et faible dans d'autres (la nuit, heures creuses). L'ensemble de ces caractéristiques engendre des problèmes complexes dont, la connectivité intermittente, la détérioration des signaux radio, la topologie dynamique, la fragmentation du réseau et la saturation du canal radio. Des solutions appropriées doivent être apportées

afin de pouvoir déployer ces réseaux et fournir des services de qualité aux conducteurs et aux passagers. D'où l'intérêt d'une étude des caractéristiques et de la dynamique de la connectivité radio dans les VANET. La maîtrise des paramètres tels que la durée des liens radio, le nombre de connexions radio par véhicule, la longueur des routes multi-sauts est un bon point de départ pour développer les solutions les plus efficaces. Les deux facteurs qui affectent ces paramètres sont les déplacements des véhicules et la dégradation des signaux radio. Notre apport majeur réside dans le fait que l'analyse présentée s'appuie sur des modèles de mobilité et de propagation radio réalistes (développés dans le cadre de cette thèse) qui garantissent la fiabilité des conclusions issues de l'étude. Ces deux modèles ont été également utilisés en conjonction avec un simulateur de protocoles réseaux pour l'étude et l'analyse des performances des protocoles de routage les plus répandus dans la littérature. L'objectif étant d'identifier les mécanismes de routage les plus appropriés pour les VANET.

Ce manuscrit de thèse est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les réseaux véhiculaires et les travaux de simulation apparentés. Nous abordons le chapitre avec une première partie qui donne une vue d'ensemble des réseaux véhiculaires en mettant l'accent sur les travaux de standardisation et les projets de recherche réalisés dans l'objectif de répondre aux défis imposés par la nature distribuée et dynamique de ces réseaux. La seconde partie du chapitre est consacrée à la modélisation de la mobilité et de la propagation radio dans les réseaux véhiculaires. Nous décrivons, en plus des travaux récemment réalisés dans ce contexte, les différentes approches de modélisation ainsi que les principaux paramètres que doivent intégrer les modèles de mobilité et de propagation radio pour atteindre le niveau de réalisme requis et garantir la validité et la fiabilité des résultats de simulation.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du nouveau modèle de mobilité pour réseaux véhiculaires que nous proposons. C'est un modèle générique qui, pour reproduire les mouvements réels des véhicules, intègre les principaux paramètres de l'environnement qui peuvent influencer le comportement des conducteurs. Le schéma de mobilité est défini à partir de données statiques et dynamiques sur l'environnement. Ces données peuvent être réelles si elles sont renseignées ou définies par l'utilisateur. Elles décrivent, en plus des attributs des routes, la répartition des individus dans l'environnement simulé et les caractéristiques variables des infrastructures de l'environnement qui influencent le comportement des conducteurs. Différents cas d'études, dont deux réalisés sur des environnements réels, sont présentés à la fin du chapitre dans l'objectif de valider le modèle. Le chapitre se termine par une synthèse qui compare notre modèle aux modèles les plus répandus dans la littérature.

Le troisième chapitre est composé de deux parties. Dans la première, nous décrivons le

nouveau modèle de propagation radio proposé. Ce modèle est une adaptation aux réseaux véhiculaires d'un modèle empirique défini dans la littérature pour les réseaux cellulaires. Dans le modèle proposé, la carte représentant l'environnement est divisée en une grille de mailles ; à chacune est affectée une classe de terrain représentant le type et la densité d'obstacles présents. Les données sur les obstacles sont déduites à partir des informations sur les caractéristiques géographiques de l'environnement simulé. La dégradation que subit le signal est prédite par le modèle de propagation en fonction des classes de terrain des mailles traversées par l'onde radio. Ce modèle est utilisé avec le modèle de mobilité défini dans le deuxième chapitre pour l'étude de la connectivité radio qui est présentée dans la seconde partie du chapitre trois. Plusieurs métriques qui caractérisent la topologie du réseau et sa variation sont présentées et analysées dans cette partie.

Dans le dernier chapitre nous présentons une étude détaillée des performances des trois protocoles de routage unicast les plus largement considérés dans les travaux de recherche à savoir AODV(*Ad-hoc On-Demand Distance Vector*), DSR(*Dynamic Source Routing*) et OLSR(*Optimized Link state Routing*). Nous évaluons et analysons les mécanismes utilisés par chacun des protocoles afin d'identifier ceux qui sont les plus appropriées pour les réseaux véhiculaires et ceux qui dégradent les performances du réseau et la cause de la dégradation. Nous nous sommes basés dans l'étude pour la simulation des couches protocolaires sur la version du simulateur ns-2 (*Network Simulator*) qui supporte les modèles les plus réalistes. Pour simuler le déplacement des véhicules et la propagation des signaux dans des environnements réels, nous avons intégré à ns-2 les deux modèles de mobilité et de propagation radio que nous avons développé. Pour montrer l'impact d'une modélisation réaliste sur les performances des services pour la dissémination d'informations, nous présentons à la fin du chapitre les résultats obtenus avec une simple application de sécurité routière.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale qui présente une synthèse de l'ensemble de nos contributions et quelques perspectives que nous avons tracées pour la poursuite du travail.

Chapitre 1

État de l'art de la simulation des réseaux véhiculaires

Ce premier chapitre est composé de deux parties. La première partie donne une vue d'ensemble des réseaux véhiculaires. Nous y présentons les différents types d'applications et les principales technologies de communication qui peuvent être mises en œuvre dans ces réseaux, les caractéristiques et challenges des réseaux véhiculaires ainsi que quelques-uns des projets de recherche, européens et américains, et travaux de standardisation réalisés dans le but de répondre à ces challenges. La seconde partie est consacrée à la simulation des VANET. Ces derniers étant une classe particulière des MANET (*Mobile Ad hoc Network*), nous abordons la partie par une brève présentation des travaux de simulation sur les MANET. Nous présentons plus en détail la simulation des VANET en séparant la simulation de la mobilité de celle de la propagation radio. Dans la partie traitant la mobilité, nous présentons les contraintes, les catégories et la classification, avec des exemples, des modèles de mobilité définis pour les VANET. Dans la partie consacrée à la propagation, nous décrivons les concepts de base de la modélisation de la propagation des signaux radio et les modèles de propagation, théoriques et empiriques, proposés pour les environnements véhiculaires.

Sommaire

1.1	Vue d'ensemble des réseaux véhiculaires	8
1.2	Simulation des MANET	20
1.3	Simulation de la mobilité dans les VANET	22
1.4	Simulation de la propagation radio dans les environnements véhiculaires	33
1.5	Vue d'ensemble des simulateurs de VANET	43
1.6	Synthèse	46

1.1 Vue d'ensemble des réseaux véhiculaires

Les réseaux véhiculaires sont constitués de deux composantes, logicielles dont les applications et les technologies de communication, et matérielles comportant les véhicules, les stations de base, les hotspots, etc.

1.1.1 Types d'applications

Nombreuses sont les applications proposées pour les réseaux véhiculaires [Khaled *et al.*, 2009], [Bai *et al.*, 2006]. Elles peuvent être classifiées en trois grandes catégories.

Le premier type d'applications, et le plus important, est **les applications de sécurité** qui visent à améliorer la sécurité des passagers sur les routes en avisant les véhicules de toute situation dangereuse. Ces applications se basent en général sur une diffusion, périodique ou non, de messages informatifs permettant aux conducteurs d'avoir une connaissance de l'état de la route et des véhicules voisins. Des exemples répandus de services dans cette catégorie d'applications sont, l'avertissement des collisions, les avertissements sur les conditions de la route, l'assistance dépassement et changement de voie, etc.

Les applications de gestion de trafic sont axées sur l'amélioration des conditions de circulation dans le but de réduire les embouteillages et les risques d'accidents. Elles consistent à fournir aux conducteurs des informations leur permettant d'adapter leur parcours à la situation du trafic routier. En d'autres termes, ces applications visent à équilibrer la circulation des véhicules sur les routes pour une utilisation efficace de la capacité des routes et des carrefours et à réduire par conséquent les pertes humaines, la durée des voyages et la consommation d'énergie. Parmi ces applications on peut citer, la surveillance du trafic, l'ordonnancement des feux de signalisation, le Platooning¹, etc.

La dernière catégorie est **les applications de confort ou de divertissement** dont l'objectif est de rendre les voyages plus agréables en permettant aux passagers de communiquer soit avec d'autres véhicules ou avec des stations fixes comme les hôtes Internet ou le réseau téléphonique public. Des exemples de ces applications sont : la gestion des parkings, les jeux/discussions distribués, les applications pair-à-pair, etc.

1. Ce service est destiné aux véhicules se déplaçant sur une autoroute et leur permet, par un échange de messages, de voyager en étroite collaboration et en toute sécurité. Les véhicules forment des colonnes serrées et se déplacent les uns derrière les autres dans le but de réduire l'espace utilisé sur l'autoroute.

1.1.2 Caractéristiques et défis

Les problématiques et défis de tout système découlent de ses caractéristiques. Dans cette section nous présentons les principaux facteurs qui caractérisent les réseaux véhiculaires ainsi que les défis qui sont engendrés.

– *Forte mobilité* : c'est le premier facteur qui distingue les réseaux véhiculaires des autres classes de réseaux sans fil. La vitesse des véhicules varie selon l'environnement, elle est en moyenne de 50km/h en zones urbaines et peut atteindre 130km/h sur autoroute. Bien que les mouvements des véhicules soient relativement prédictibles, l'impact de la mobilité sur la connectivité du réseau reste l'une des difficultés majeures des réseaux véhiculaires.

– *Caractéristiques inhérentes au canal radio* : dans les réseaux sans fil traditionnels, les échanges de données s'effectuent généralement dans des espaces ouverts sans obstacle ou dans des espaces clos en intérieur. Les communications dans les réseaux véhiculaires se font en environnement externe défavorable pour l'établissement des liens radio en raison de la multitude d'obstacles (forêts, montagnes, bâtiments ...) notamment en zones urbaines. Ces obstacles causent une sévère dégradation de la qualité et de la puissance des signaux émis.

– *Connectivité intermittente* : une conséquence directe de la forte mobilité et des obstacles de l'environnement est une connectivité intermittente. Un lien établi entre deux entités du réseau peut rapidement disparaître en raison soit de la mobilité qui éloigne les deux entités communicantes, soit des obstacles qui empêchent la propagation du signal.

– *Diversité de la densité* : la densité des nœuds dans un réseau véhiculaire n'est pas uniforme mais à variation spatio-temporelle. La densité en milieu urbain est par exemple beaucoup plus élevée qu'en milieu rural. Le nombre de véhicules dans une intersection ou dans un embouteillage est plus important que sur des routes extra-urbaines où le trafic est souvent fluide. D'un point de vue temporel, la densité est par exemple différente selon qu'on considère la nuit ou la journée, les heures de pointe ou les heures creuses. Cette diversité de la densité rend difficile la conception de solutions génériques étant donné que les problèmes rencontrés à forte densité sont différents de ceux causés par la faible densité.

– *Partitionnement du réseau* : le problème du partitionnement du réseau survient essentiellement lorsque la densité des nœuds est faible. Les véhicules se déplacent alors en groupes isolés non connectés. Il devient dans ce cas difficile d'assurer les communications de bout-en-bout.

– *Broadcast storm* : le problème du broadcast storm a été considéré depuis longtemps dans les réseaux MANET et diverses solutions ont été proposées [Ni *et al.*, 1999]. Ce problème se pose en particulier dans les protocoles de routage qui inondent le réseau avec les paquets de contrôle à la recherche de routes. Les retransmissions successives des paquets

causent de sérieuses redondances qui saturent le réseau. Dans le cas des réseaux véhiculaires, le problème du broadcast storm se pose également au niveau application. En effet, les principaux services proposés pour les réseaux véhiculaires sont des services de sécurité qui se basent presque exclusivement sur les retransmissions de proche en proche des données. De plus, le problème du broadcast storm est aggravé dans les réseaux à forte densité notamment dans des scénarios tels les embouteillages et les files d'attente aux intersections.

Des caractéristiques des réseaux véhiculaires découlent plusieurs défis que l'on peut résumer en ces points :

- *Qualité de service* : la demande en qualité de service dépend des applications supportées. La principale contrainte des applications de sécurité est la latence. La validité des informations étant limitée dans le temps, les messages doivent parvenir à destination dans des délais courts pour être considérés comme pertinents. Dans le cas des applications de gestion de trafic, il s'agit essentiellement de la définition d'algorithmes d'agrégation des données qui permettent d'inclure autant d'informations de trafic que possible dans les paquets diffusés [Toor *et al.*, 2008]. Pour les applications de confort tel le transfert de fichiers ou le téléchargement le besoin est une connectivité permanente.

- *Canal radio fiable* : le rôle des mécanismes de gestion du canal radio est d'offrir des transmissions fiables et robustes et un partage équitable du médium de communication. Pour atteindre cet objectif dans le cas des réseaux véhiculaires, il est nécessaire de définir des méthodes qui permettent de faire face aux deux problèmes majeurs des transmissions qui sont, les interférences inter-symboles dues à la propagation des ondes par trajets multiples et l'effet Doppler causé par le mouvement des véhicules.

- *Routage* : les protocoles de routage sont utilisés en communications ad hoc. Ils permettent de déterminer la suite de nœuds que les paquets doivent traverser pour un échange d'information entre entités distantes. Les problèmes auxquels doivent répondre les protocoles de routage sont la connectivité intermittente qui rend les routes déjà établies obsolètes et le partitionnement du réseau qui empêche la propagation des paquets.

- *Adressage géographique et geocasting* : le routage geocast [Maihöfer, 2004] est un mécanisme similaire au multicasting dans lequel les destinataires sont identifiés par des contraintes géographiques. Il est utilisé par les applications diffusant des données qui ne sont utiles que pour les véhicules se trouvant dans une zone géographique spécifique. Par exemple, l'information sur un accident n'est pertinente que pour les véhicules qui se dirigent vers le lieu de l'accident. La diffusion des paquets vers tout autre véhicule cause une surcharge inutile du réseau. La complexité dans le geocasting réside dans la détermination de la zone géographique et la définition d'un mécanisme de relaying efficace qui réduit la surcharge du réseau et qui soit adapté à toutes les densités [Khaled *et al.*, 2009].

– *Sécurité* : les exigences en sécurité doivent être prises en compte aussi bien dans la conception architecturale du réseau que dans la conception des protocoles de communication. Elles diffèrent en fonction des applications et comprennent principalement la confidentialité, l'authentification, la cohérence et l'intégrité des données et la disponibilité. La satisfaction de ces exigences dans des systèmes aussi dynamiques et mobiles que les réseaux véhiculaires est difficile mais particulièrement importante étant donné que des vies humaines sont concernées.

– *Normalisation vis-à-vis de la flexibilité* : il est évidemment nécessaire d'uniformiser les communications afin de permettre aux véhicules conçus par différents fabricants de pouvoir collaborer. Cependant, en raison des enjeux commerciaux, il est probable que les constructeurs voudront créer une certaine différenciation des standards.

1.1.3 Architectures de communication

Les réseaux véhiculaires se composent de véhicules et de toutes les entités avec lesquelles les véhicules peuvent établir des communications. Ceci donne la possibilité de trois modes d'opération; *Mode avec infrastructure* où le véhicule se connecte à des stations fixes pour l'acquisition ou la transmission d'informations, on parle alors de communications de véhicules à infrastructure (V2I : *Vehicle to Infrastructure*); *Mode ad hoc* dans lequel les véhicules collaborent de manière décentralisée sans s'appuyer sur une quelconque infrastructure et forment un réseau ad hoc, le VANET, où les communications se font uniquement de véhicule à véhicule (V2V : *Vehicle to Vehicle*); *Mode hybride*, qui combine les deux premiers modes, les communications véhicule à véhicule sont utilisées pour étendre la zone de couverture des infrastructures.

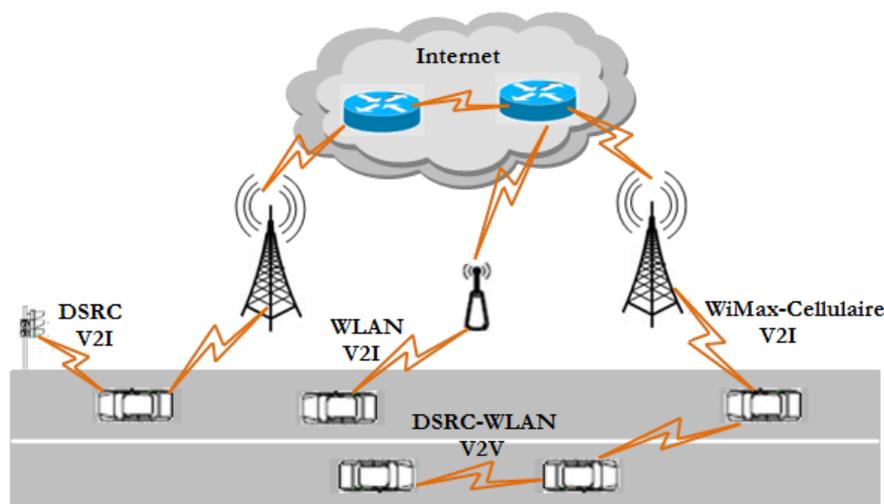


FIGURE 1.1 – Technologies de communication dans les réseaux véhiculaires.

Diverses technologies de communication peuvent être utilisées pour assurer les échanges de données dont le WLAN (*Wireless Local Area Network*), le WiMax, les réseaux cellulaires et les systèmes DSRC comme le montre la figure 1.1. L'intérêt d'utiliser une technologie plutôt qu'une autre est étroitement lié au type d'applications envisagées.

L'idée d'introduire les réseaux cellulaires dans les réseaux de véhicules date du début des années 1990 [Andrisano *et al.*, 2000], [ComCar, 2001]. Elle consiste à utiliser des technologies telles que le GSM (*Global System for Mobile Communications*), le GPRS (*General Packet Radio Service*) et l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) pour les communications à longue distance V2I. Les principaux arguments que présentent certains auteurs pour l'utilisation des réseaux de la téléphonie mobile dans les environnements véhiculaires sont le fait que l'infrastructure est déjà existante et que dans un avenir proche la plupart des véhicules auront accès à ces réseaux. Les systèmes de deuxième génération sont très peu considérés en raison de leur faible débit de données [Andrisano *et al.*, 2000]. L'intérêt est porté sur la technologie UMTS qui offre des débits plus élevés et supporte la mobilité à grande vitesse. C'est le cas du projet Allemand FleetNet [Festag *et al.*, 2002] qui se base sur cette technologie pour l'accès à Internet et les communications V2V [Lott *et al.*, 2001]. Cependant, l'inconvénient des réseaux cellulaires reste le problème de latence et le coût supplémentaire nécessaire pour l'utilisation des infrastructures des opérateurs [Sichitiu & Kihl, 2008].

En raison du large déploiement des réseaux de type WLAN, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés considérant cette technologie pour les communications en mode infrastructure [Navda *et al.*, 2007], [Balasubramanian *et al.*, 2008] ou en mode ad hoc [Ammoun *et al.*, 2006], [Biswas *et al.*, 2006]. Cependant, les WLAN étant conçus pour les réseaux à faible mobilité et à faible portée (variable selon les standards nationaux de puissance et les normes), ils ne peuvent répondre aux exigences de la plupart des applications envisagées pour les réseaux véhiculaires. Pour surmonter cette insuffisance, une nouvelle technologie de type WLAN a été proposée par l'ITSA (*Intelligent Transportation Society of America*) spécifiquement pour les communications dans les réseaux véhiculaires. Cette technologie, nommée DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*), se base sur une nouvelle variante de la norme IEEE 802.11 dite IEEE 802.11p. En utilisant la gamme de fréquences des 5,9GHz et la technique de codage OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), DSRC peut supporter des vitesses allant jusqu'à 200km/h et offrir des portées de transmission qui peuvent atteindre les 1000m. Ces caractéristiques permettent à DSRC de couvrir les exigences des communications à la fois d'informations périodiques et critiques et supporter le déploiement d'une grande variété de services pour véhicules, en utilisant les deux modes V2V et V2I [Khaled *et al.*, 2009]. Parmi les travaux de recherche qui considèrent cette technologie on peut citer [Yang *et al.*, 2004], [ElBatt *et al.*, 2006], [Jiang *et al.*, 2006] et [Ma *et al.*, 2009].

La norme 802.16e de la technologie WiMax constitue une autre possibilité pour la communication dans les réseaux véhiculaires. Les mécanismes sur lesquels se base cette norme lui permettent de supporter des vitesses allant jusqu'à 100km/h sur une zone de couverture de 10km. Ces caractéristiques font du WiMax une bonne option pour les scénarios urbains dans lesquels les véhicules peuvent être connectés avec un débit de données élevé à des stations de base pour l'acquisition d'informations.

Depuis leur avènement, les réseaux véhiculaires sont un champ très attractif dans le domaine de la recherche et du développement. Plusieurs travaux et projets de recherche et activités de standardisation ont été réalisés durant ces 20 dernières années dans ce domaine.

1.1.4 Activités de standardisation

a) *Dedicated Short Range Communications*

Les premiers standards définis pour les communications sans fil dans les STI utilisent la bande de fréquence de 915MHz essentiellement pour assurer des services tels que, le péage électronique, l'accréditation et la surveillance des opérations des véhicules commerciaux. Cette bande de fréquence étant trop étroite et polluée pour supporter l'évolution envisagée pour les applications dans les réseaux véhiculaires, l'ITSA a sollicité la FCC (*Federal Communications Commission*) pour l'allocation d'une bande passante de 75MHz dans la gamme de fréquences 5,850-5,925GHz pour les communications à courte portée dédiées aux STI aux USA. Cette demande a été accordée par la FCC en 1999 et a donné naissance à la technologie DSRC.

En Europe, l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) a créé un comité technique pour les STI fin 2007 dont la mission est la création de normes et de spécifications pour l'utilisation des technologies de l'information et de la communication dans les futurs systèmes de transport en Europe. Le processus d'attribution des fréquences en Europe est beaucoup plus complexe et plus fastidieux qu'aux USA étant donné que tous les pays européens et leurs autorités nationales sont concernés. Ce n'est qu'en août 2008 que l'ETSI a affecté un spectre de fréquences dans la bande des 5,9GHz pour l'accès sans fil dans les réseaux véhiculaires.

Du point de vue technique, l'approche européenne pour les communications des véhicules a de nombreux points communs avec le système américain. Les deux se fondent sur la variante 802.11p de la norme IEEE 802.11 avec une bande de fréquences similaires et utilisent principalement des messages périodiques envoyés par chaque véhicule et infrastructure pour les services de sécurité et IPv6 pour les services de données.

Comme le montre la figure 1.2, la bande passante est divisée en sept canaux de 10MHz [Festag & Hess , 2009]. Les canaux se répartissent fonctionnellement en un canal de contrôle

et six canaux de service. Le canal de contrôle est réservé à la transmission des messages de gestion du réseau tel que les messages d'annonce de services et les messages de très haute priorité comme certains messages critiques liés à la sécurité routière. Les six autres canaux sont dédiés à la transmission des données des différents services annoncés sur le canal de contrôle.

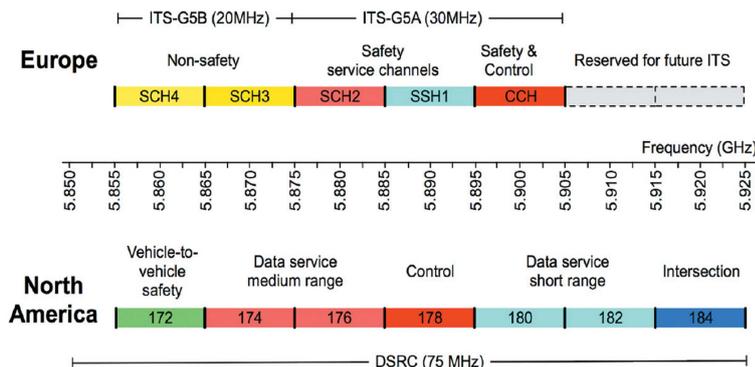


FIGURE 1.2 – Allocation des fréquences DSRC en Amérique du Nord et en Europe.

b) *La norme IEEE 802.11p*

La norme IEEE 802.11p [IEEE802.11p, 2006] est un amendement du standard IEEE 802.11 que le groupe de travail IEEE (TGP, task group p) a commencé à développer en 2004 pour l'accès sans fil dans les systèmes de transport intelligents. Il définit les spécifications des couches MAC et PHY dans le cadre des réseaux véhiculaires.

La couche physique du 802.11p utilise les mêmes mécanismes de traitement de signal et les mêmes spécifications que dans le standard 802.11a avec cependant quelques modifications pour l'adapter aux environnements véhiculaires. Pour offrir des communications à grandes portées, quatre classes de puissance maximale EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) sont autorisées. La plus grande valeur, 44,8dBm (30w), est réservée pour les véhicules d'urgence (*approaching emergency vehicles*). La valeur typique des messages de sécurité pertinents est de 33dBm. Pour augmenter la tolérance à l'effet de propagation des signaux par trajets multiples, une bande passante de 10MHz est utilisée au lieu de 20MHz comme dans la norme 802.11a. En réduisant la bande passante, tous les paramètres du domaine temporel sont doublés. Ceci permet de réduire d'une part l'effet Doppler grâce à l'utilisation d'une bande passante plus petite et d'autre part, les interférences inter-symboles en doublant la valeur des intervalles de garde. Ces modifications permettent à la norme 802.11p d'offrir des débits allant de 3 à 27Mbit/s sur des portées de communications de 300m à 1000m.

La couche MAC de la norme 802.11p est équivalente à la technique EDCA (*Enhanced*

Distributed Channel Access) de la norme 802.11e. Dans EDCA, les messages sont classifiés en quatre catégories d'accès (AC, *Access Category*) avec, AC0 la catégorie de messages ayant la plus faible priorité et AC3 la catégorie de ceux ayant la plus grande priorité. A chaque catégorie est associée une file d'attente où sont gardés les paquets en attente d'envoi. La priorité est assurée en affectant différents paramètres d'accès à chaque catégorie.

c) *Wireless Access in Vehicular Environments*

L'IEEE a développé une architecture connue sous le nom de WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*), pour fournir l'accès sans fil dans les environnements véhiculaires [TGp, 2006]. Deux modes de communication sont possibles dans l'architecture WAVE, véhicule-à-véhicule et véhicule-à-infrastructure. Les véhicules communiquent via un dispositif installé à leur bord dit, OBU (*On Board Unit*) montré sur la figure 1.3. Les infrastructures, sont équipées de dispositif dit RSU (*RoadSide Unit*) montré sur la figure 1.4. Les RSU sont des entités fixes qui permettent de connecter les véhicules aux réseaux communs qui par la suite les connectent au cœur central du réseau. Les RSU sont habituellement installés sur des infrastructures existantes tels que les feux de circulation, les panneaux routiers ou encore les lampadaires. En plus des capteurs, les RSU disposent d'un émetteur-récepteur DSRC et d'un processeur d'applications qui offre des services de sécurité et des services non liés à la sécurité pour les multiples OBU qui sont dans la zone de transmission. Un OBU est un équipement WAVE mobile qui permet des communications OBU à OBU en mode ad hoc, et des communications OBU à RSU en mode infrastructure. Les OBU sont également reliés à une gamme de capteurs et d'actionneurs au sein du véhicule. Ceci facilite la surveillance efficace des véhicules pour rassembler des informations comme la vitesse du véhicule et son accélération.

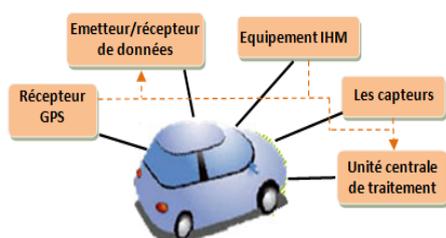


FIGURE 1.3 – WAVE On Board Unit.

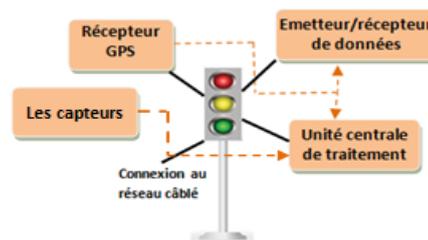


FIGURE 1.4 – WAVE RoadSide Unit.

La figure 1.5 montre l'architecture WAVE qui est une association de l'amendement IEEE 802.11p et de quatre standards 1609.1, 1609.2, 1609.3, et 1609.4 définis par le groupe de travail IEEE 1609 pour décrire les spécifications des couches hautes pour les communications WAVE :

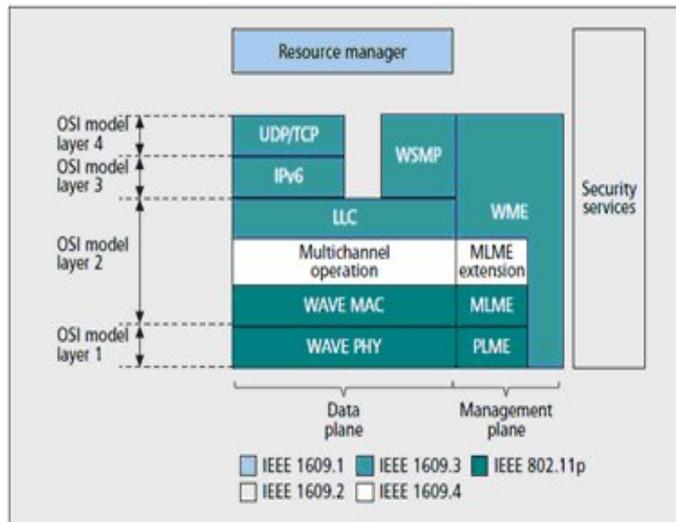


FIGURE 1.5 – Architecture protocolaire du système WAVE [Uzcategui & Acosta-Marum, 2009].

- *IEEE 1609.1 (Gestionnaire des ressources)* [1609.1, 2006] : ce standard décrit le service de gestion de ressources dit RM (*Resource Manager*) conçu pour permettre aux applications distantes de communiquer avec les OBU via les RSU. Le RM a pour objectif de répondre aux exigences des applications distantes en leur fournissant un accès en temps opportun aux ressources du OBU telles que la mémoire et l'interface utilisateur de manière cohérente et en garantissant l'interopérabilité.
- *IEEE 1609.2 (Services de sécurité pour les applications et les messages de gestion)* [1609.2, 2006] : décrit les services de sécurité dans le système WAVE. Les principales applications du système étant des applications de sécurité critiques, il est vital de définir des services de sécurité afin de protéger les messages contre les attaques telles que l'écoute clandestine, l'usurpation d'identité, et aussi de préserver la vie privée des conducteurs. Ce standard définit le format des paquets et les fonctions de sécurité, de chiffrement et d'authentification, pour les trois types de messages, de sécurité, de données et de gestion.
- *IEEE 1609.3 (Services de la couche réseau)* [1609.3, 2007] : ce standard décrit les fonctions des couches réseau et transport pour les communications dans un système WAVE dont l'adressage et le routage. Il définit un nouveau type de messages dits WSM (*WAVE Short Messages*) et un nouveau protocole WSMP (*WAVE Short Messages Protocol*) pour la transmission des WSM. Le WSMP est une alternative à IPv6 qui fournit aux applications un échange de données efficace en leur permettant d'envoyer les WSM directement sur n'importe quel canal de DSRC.
- *IEEE 1609.4 (Opération multi-canal)* [1609.4, 2006] : étant basés sur le DSRC, les dispositifs WAVE doivent fournir un accès multi-canal et permettre des communi-

tions sur le canal de contrôle et les canaux de service. C'est le rôle du standard 1609.4 qui définit tous les mécanismes nécessaires pour l'accès avec priorité aux canaux, la coordination et le routage des données vers les canaux et la transmission des données.

1.1.5 Projets de recherche

Les objectifs visés par les projets réalisés dans le cadre des réseaux véhiculaires sont divers. Ils peuvent concerner la conception et la validation de nouveaux protocoles de communication et/ou d'applications tels que les projets VII et CarTalk ; le développement d'architectures de communication basées sur une ou plusieurs technologies de communication tels que FleetNet, CVIS et GeoNet ; la sécurité des données comme dans les projets NoW et SeVeCom ou encore la standardisation qui est l'objectif des projets C2C-CC et COMeSafety.

a. Projets Américains

- **VSC.** *Vehicle Safety Communication* est un projet qui réunit sept constructeurs automobiles dont Mercedes-Benz, Ford et Toyota avec US DOT (*United States Department of Transportation*). VSC a pour objectif d'estimer le potentiel des applications de sécurité basées sur la communication inter véhicules et de déterminer les besoins en communication des applications de sécurité de haute priorité. Les tests réalisés dans le cadre de ce projet visent également à confirmer que DSRC est la norme qui répond le mieux aux exigences de communications. En décembre 2006, le Consortium VSC-2 a initié un projet de trois ans, VSC-A (VSC-Application) [VSC-A, 2011], avec US DOT pour effectuer des essais de mise en œuvre et de vérification de l'utilisation de la technologie de positionnement des véhicules en association avec DSRC pour le support d'une variété d'applications de sécurité.
- **VII.** *Vehicle Infrastructure Integration*² est un autre projet américain issu de la collaboration du département de transport (US DOT) avec plusieurs constructeurs automobiles. Son objectif est de fournir une variété d'applications de sécurité des véhicules et d'applications à intérêt commercial pour les constructeurs automobiles en utilisant la technologie DSRC et le système GPS.

b. Projets Européens

- **FleetNet.** FleetNet [Franz *et al.*, 2001] est un projet basé en Allemagne qui regroupe

2. <http://www.vehicle-infrastructure.org/>

six industriels et trois universités. Son principal objectif est le développement d'une plate-forme basée sur la technologie UMTS pour les communications inter-véhicules et l'accès à Internet.

- **CarTalk.** CarTalk 2000³ est un projet européen coordonné par le constructeur automobile *Daimler Chrysler* qui met l'accent sur les systèmes d'assistance à la conduite basés sur la communication inter-véhicule. Les principaux objectifs sont la conception, le test et l'évaluation de systèmes coopératifs d'aide à la conduite et le développement d'un réseau de communication ad hoc auto-organisé dont le but est de préparer une future norme. CarTalk traite également les problèmes non technologiques concernant la conception et l'évaluation des stratégies d'introduction au marché comprenant l'analyse des coûts, la normalisation et les aspects juridiques.
- **NoW.** *Network on Wheels*⁴ est un projet de recherche allemand fondé par des constructeurs automobile, des acteurs de télécommunication et des universités. Son objectif est de résoudre les questions techniques clés relatives aux protocoles de communication et à la sécurité des données dans les communications V2V et de présenter les résultats au consortium européen de normalisation *Car2Car Consortium Communications*.
- **C2C-CC.** Le *Car2Car Consortium Communications*⁵ est un organisme industriel sans but lucratif lancé par les constructeurs automobiles européens et soutenu par les fournisseurs d'équipements, les organismes de recherche et d'autres partenaires. Son objectif est de contribuer à la création d'une norme européenne pour les futures communications véhiculaires couvrant tous les constructeurs. Par conséquent, C2C-CC travaille en étroite collaboration avec les organismes de normalisation européens et internationaux en particulier l'ETSI. En outre, C2C-CC est un acteur clé du processus de validation des tests V2V et V2I.
- **CVIS.** *Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*⁶ est un autre projet parrainé par l'union européenne qui a pour objectif d'accroître la sécurité routière. CVIS vise à créer une solution technique unique permettant à tous les véhicules et les équipements routiers de communiquer les uns avec les autres d'une manière continue et transparente en utilisant une variété de médias et de techniques de positionnement améliorées tel que le positionnement par satellite et la triangulation radio. Le but est de fournir

3. <http://www.cartalk2000.net/>

4. <http://www.network-on-wheels.de/>

5. <http://www.car-to-car.org/>

6. <http://www.cvisproject.org/>

un système ouvert pour le développement d'un large éventail de services et d'applications coopératifs dans lequel les véhicules et les infrastructures utilisent une large gamme de supports dont les réseaux cellulaires, le Wifi, l'infrarouge et DSRC.

- **GeoNet.** GeoNet⁷ est un projet européen qui associe sept partenaires dont l'objectif est le développement d'une architecture de communication unique et transparente nommée *IPv6 geonetworking*. Cette architecture est basée à la fois sur le routage géographique et le protocole de communication Internet IPv6. Le routage géographique permet les communications multi-sauts de véhicule à véhicule pour l'envoi de messages vers un ensemble de destinataires localisés dans une zone géographique donnée. Le protocole IPv6 permet la communication entre les véhicules et l'infrastructure routière pour l'accès à Internet et l'acquisition d'informations.
- **SeVeCom.** *Secure Vehicular Communication*⁸ est un projet financé par l'union européenne qui vise à fournir la définition complète et la mise en œuvre des exigences de sécurité de données pour les communications V2V et V2I. Dans le but de renforcer l'immunité des futures applications, SeVeCom traite trois aspects importants qui sont l'identification des diverses menaces, la spécification d'une architecture et des mécanismes de sécurité qui assurent un bon niveau de protection et, la définition des primitives de cryptographie qui prennent en compte les spécificités de l'environnement opérationnel.
- **COMeSafety** *Communications for eSafety*⁹ est un projet européen dont l'objectif est la consolidation des résultats des travaux réalisés dans le cadre des projets européens et nationaux. L'idée de base est de collecter et consolider les exigences des projets considérés et utiliser les résultats de la consolidation comme base pour la normalisation européenne et le processus d'attribution des fréquences.

Le nombre important de protocoles, d'applications et d'approches sans cesse proposés pour les réseaux véhiculaires d'une part et la difficulté d'un déploiement réel de ce type de réseau d'autre part, ont fait de la simulation le moyen le plus communément utilisé par la communauté de recherche et de développement pour l'évaluation et la validation des solutions proposées. Ceci a donné naissance à plusieurs travaux traitant de la modélisation et de la simulation des réseaux véhiculaires que nous présentons dans la suite de ce chapitre.

On s'intéresse particulièrement à la simulation des réseaux véhiculaires ad hoc (VANET)

7. <http://www.geonet-project.eu/>

8. <http://www.sevecom.org/>

9. <http://www.comesafety.org/>

qui constitue l'objet de notre travail. Les simulateurs de réseaux définis pour les VANET sont pour la plupart des adaptations et extensions des simulateurs de réseaux MANET.

1.2 Simulation des MANET

Deux aspects peuvent être distingués dans la simulation d'un MANET : l'aspect protocolaire qui consiste à modéliser les protocoles et mécanismes utilisés par les services et applications réseau et l'aspect comportement qui est axé sur la modélisation du comportement des entités du réseau.

1.2.1 Modélisation des couches protocolaires

La modélisation des couches protocolaires consiste en la définition d'algorithmes permettant de reproduire les mécanismes utilisés dans les différentes couches qui interviennent dans les communications réseau tels que l'établissement des connexions au niveau transport, l'adressage au niveau réseau ou encore la politique d'accès au canal et d'ordonnancement au niveau liaison de données.

La simulation des couches protocolaires a suscité un grand intérêt de la communauté scientifique. Dans le cas des MANET, les travaux portent davantage sur les algorithmes de routage et les méthodes d'accès au canal radio. Il s'agit des problèmes les plus largement étudiés. ns-2 [Fall & Vatadha, 2000], qui est le simulateur de référence pour les MANET, implémente plusieurs protocoles de routage dont AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector*), DSR (*Dynamic Source Routing*) et TORA (*Temporally-Ordered Routing Algorithm*). Les mécanismes d'accès au canal, intégrés au simulateur, sont les variantes a, b et g de la norme 802.11. Les dernières versions de ns-2 intègrent également la variante 802.11p. L'équivalent commercial de ns-2 est le simulateur OPNET¹⁰. Ce dernier est un simulateur puissant qui prend en charge plusieurs topologies sans fil telles que les WLAN, les MANET et le WiMax. Il implémente également plusieurs protocoles de routage MANET et comme mécanisme d'accès au canal les variantes a, b, e, g, et n de la norme 802.11. D'autres simulateurs, moins adoptés que ns-2 et OPNET sont également utilisés dans la littérature notamment le simulateur commercial QualNet¹¹ et sa version gratuite Glomosim [Zeng *et al.*, 1998]. Une description détaillée de ces simulateurs et d'autres est présentée dans [Yan *et al.*, 2009] et [Martinez1 *et al.*, 2009].

10. <http://www.opnet.com/>

11. <http://www.scalable-networks.com>

1.2.2 Modélisation du comportement

Il s'agit de la modélisation de la mobilité des entités du réseau et de la propagation des signaux radio dans l'environnement. Un modèle de mobilité décrit l'ensemble des règles qui définissent le schéma de mouvement des mobiles. Ce schéma est utilisé par les simulateurs réseaux pour créer des topologies aléatoires basées sur la position des mobiles. Les modèles de propagation sont des formulations mathématiques qui caractérisent la manière dont les signaux radio se propagent dans l'environnement que l'on souhaite simuler. Les simulateurs de réseaux utilisent ces formules pour estimer la puissance du signal reçue en fonction de plusieurs paramètres tels que, la puissance émise, la fréquence d'émission, la distance entre les antennes émettrice et réceptrice et la nature de l'environnement.

La modélisation de la mobilité et de la propagation radio est plus complexe que celle des couches protocolaires. Les comportements sont influencés par plusieurs paramètres et ne peuvent être représentés par des modèles déterministes. Cependant, la plupart des travaux réalisés sur les MANET ignorent cette influence et se basent sur des modèles simples.

Dans [Camp *et al.*, 2002], les auteurs ont dressé un panorama des modèles de mobilité définis pour les MANET. L'ensemble des modèles présentés sont simples et manquent de réalisme. Le plus répandu est RWP (*Random Waypoint Model*). Dans ce modèle, chaque mobile choisit une destination aléatoire vers laquelle il se déplace avec une vitesse aléatoire. Une fois la destination atteinte, le mobile marque une pause, choisit une nouvelle destination et répète le même processus. RWP ainsi que RDM (*Random Direction Model*) et MRDM (*Modified Random Direction Model*) sont intégrés à ns-2. OPNET intègre plusieurs modèles de mobilité dont RWP, RDM, *Arbitrary trajectories* et *Mobility Pattern Generators*.

Les modèles de propagation radio les plus communément considérés dans la simulation des réseaux ad hoc sont *free space* et *two-ray ground* qui supposent un espace ouvert sans obstacle. ns-2 intègre, en plus de ces deux modèles, les modèles Ricean, Rayleigh et Nakagami qui tiennent compte de la propagation par trajets multiples ainsi que le modèle Shadowing qui modélise la variation aléatoire de la puissance reçue. OPNET intègre également plusieurs modèles dont *free space*, *two-ray ground*, Rayleigh, Ricean, Hata et Walfish-Ikegami.

La modélisation des couches protocolaires dans les réseaux véhiculaires est similaire à celle des réseaux MANET. Les simulateurs définis pour les MANET peuvent être utilisés pour les VANET. Cependant ces simulateurs doivent être étendus pour inclure les solutions spécifiques aux réseaux véhiculaires tels que, la géo-localisation, les protocoles de routage géographiques et la norme 802.11p. La différence entre les simulateurs des réseaux MANET et ceux des réseaux VANET réside dans la modélisation de la mobilité et de la propagation

des signaux radio.

1.3 Simulation de la mobilité dans les VANET

Les déplacements des véhicules ne peuvent pas être représentés par les modèles de mobilité définis pour les individus. Cela est dû d'une part au fait que les véhicules ont moins de liberté dans leurs mouvements, ils ne peuvent se déplacer que sur les routes et doivent obéir aux règles de circulation, et d'autre part, par la prise en compte de l'interaction entre véhicules.

1.3.1 Approches de modélisation

Selon le niveau de réalisme que l'on souhaite atteindre et les informations utilisées pour la simulation de la mobilité, quatre approches peuvent être distinguées :

A. Modélisation synthétique

Cette première approche est la plus répandue. D'importantes études ont été entreprises afin de développer des modèles mathématiques réalistes qui reflètent des phénomènes physiques. Fiore et al. [Fiore & di Torino, 2006] ont présenté une étude complète des modèles entrant dans cette catégorie. Dans leur classification, les auteurs distinguent cinq catégories de modèles synthétiques ; *(i) Les modèles stochastiques* qui limitent la description de la mobilité à des mouvements purement aléatoires de nœuds dans un graphe ; *(ii) Les modèles à flux de trafic* qui considèrent la mobilité des véhicules comme un phénomène hydrodynamique et essaient de relier trois variables fondamentales qui sont la vitesse (km/h), la densité des véhicules (véhicules/km) et le flux de véhicules (véhicules/h) ; *(iii) Les modèles car following* qui décrivent le comportement de chaque véhicule en fonction du véhicule qui le précède ; *(iv) Les modèles de file d'attente* qui modélisent chaque route par une file d'attente FIFO et chaque voiture en tant que client ; *(v) Les modèles de comportement* où chaque mouvement est déterminé par les règles de comportement tels que les influences sociales.

Les modèles de cette catégorie nécessitent en général une étape supplémentaire de validation qui peut se faire en comparant par exemple les résultats issus du modèle à des traces recueillies sur la mobilité des individus.

B. Modélisation à base d'enquêtes

Dans cette classe de modèles, les schémas de mobilité sont déduits à partir de données

issues d'enquêtes de déplacements. Les grandes enquêtes à grande échelle sont celles réalisées par le ministère du travail américain (*US department of Labor*), qui a rassemblé des statistiques détaillées sur le comportement des travailleurs américains, concernant, les trajets effectués, l'heure du déjeuner, le mode de transport préféré, les distances parcourues, etc. En se basant sur ce type de statistiques, il est possible de développer un modèle de mobilité générique capable de reproduire le comportement pseudo-aléatoire ou déterministe observé dans le trafic urbain réel. Ce type d'enquêtes est aussi réalisé en France par le CERTU (*Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques*)¹² et les collectivités territoriales (Enquêtes Ménages-Déplacements).

C. Modélisation à base de traces

En raison de la complexité de la modélisation des mouvements des véhicules, seuls quelques modèles synthétiques très complexes sont en mesure de se rapprocher d'une modélisation réaliste des schémas de mobilité [Fiore & di Torino, 2006]. La modélisation à base de traces est une approche moins complexe qui peut être utilisée pour la définition de modèles réalistes. Au lieu de développer des modèles complexes et de les calibrer à l'aide de traces de mobilité ou d'enquêtes, un temps crucial peut être économisé en extrayant directement des schémas de mobilité générique à partir de traces de mouvements réels.

Cette approche est devenue très populaire dès lors que des traces de mobilité ont commencé à être recueillies par les différentes campagnes de mesure lancées dans le cadre de projets tels que, le projet développé conjointement par Fleetnet et NoW, qui utilisent des traces mesurées par Daimler AG dans une section d'autoroute ; le projet UMAss Diesel-Net [Soroush *et al.*, 2009], mené à l'université de Massachusetts, qui fournit des traces de mobilité du système de bus dans la ville de Amherst, MA USA ; et le projet Cabspotting¹³ qui fournit une visualisation complète et en temps réel du système de taxis dans la ville de San Francisco.

D. Modélisation à base de générateurs de trafic

En affinant les modèles synthétiques et en passant par un processus de validation intense basé sur des traces réelles ou enquêtes sur le trafic routier, certaines entreprises et équipes de recherche ont développé des simulateurs de trafic réalistes qui génèrent des traces de mobilité de véhicules. Conçus pour l'ingénierie du trafic urbain, les générateurs de trafic sont capables de modéliser le trafic urbain avec un niveau de détail précis et de modéliser des phénomènes tels que, la consommation d'énergie, la pollution ou encore le niveau du bruit.

12. <http://www.certu.fr/>

13. <http://cabspotting.org/index.html>

E. Synthèse

En résumé, il n'existe aucune approche parfaite pour la modélisation de la mobilité, chacune est un compromis entre simplicité et réalisme. La limitation principale des modèles synthétiques est la complexité d'une modélisation détaillée du comportement des conducteurs qui sont loin d'être des machines et ne peuvent être programmés pour suivre un comportement spécifique dans toutes les situations. Ils ont plutôt tendance à répondre à des stimuli et à des perturbations locales qui peuvent avoir un effet global sur la modélisation de la mobilité.

La limitation des approches basées sur les enquêtes vient du fait que l'enquête ou les données statistiques ne sont en mesure de fournir qu'une caractérisation globale de la mobilité, modélisant la mobilité générale au lieu de mouvements précis. Cependant ces modèles ont l'avantage d'être en mesure de représenter une mobilité particulière qui serait trop complexe à modéliser par des équations mathématiques. Toutefois, pour une représentation plus détaillée et plus réaliste de la mobilité, il est nécessaire d'utiliser un modèle synthétique complexe qu'il faut calibrer à l'aide d'enquêtes ou de statistiques [Härri *et al.*, 2009].

La difficulté dans la conception de modèles de mobilité à partir de traces réside dans l'extrapolation des schémas qui ne sont pas directement observés dans les traces. La limitation est aussi souvent liée à la classe de la campagne de mesure. Par exemple, si des traces de mouvement ont été recueillies pour les systèmes de bus, un modèle extrapolé ne peut être appliqué à la circulation des véhicules personnels. Une autre limitation à cette approche est la disponibilité limitée des traces.

L'inconvénient majeur de l'approche basé sur les générateurs de trafic est la complexité de la configuration des simulateurs. Le calibrage nécessite généralement de configurer un ensemble important de paramètres. Plus important encore, le niveau de détail requis pour simuler les réseaux de véhicules peut ne pas être aussi exigeant que celui pour l'analyse du trafic. En outre, la plupart de ces simulateurs ne peuvent pas être directement utilisés par les simulateurs de réseau, les interfaces n'ont pas été développées et les fichiers traces sont mutuellement incompatibles [Härri *et al.*, 2009].

1.3.2 Blocs fonctionnels d'un modèle de mobilité

Selon Fiore [Fiore *et al.*, 2007], afin de garantir sa validité par rapport à la mobilité réelle, un modèle de mobilité doit intégrer deux niveaux, la macro-mobilité et la micro-mobilité. La *macro-mobilité* consiste à modéliser les aspects macroscopiques qui influencent le trafic véhiculaire. Il s'agit de décrire la topologie du réseau routier, les caractéristiques

de chaque route (à double sens ou à sens unique, le nombre de voies, la vitesse limite...), les règles de dépassement et de sécurité au niveau de chaque route, les signaux présents au niveau des intersections (feux de signalisation, panneaux stop...), etc. La *micro-mobilité* se concentre plutôt sur le comportement individuel de chaque conducteur. Elle consiste à modéliser des caractéristiques telles que, l'accélération, la décélération, le freinage et l'interaction du conducteur avec les autres conducteurs et avec l'infrastructure routière.

Dans [Härri *et al.*, 2009], les auteurs proposent une décomposition plus détaillée des modèles de mobilité pour véhicules que nous résumons en quatre modules fonctionnels représentés dans la figure ci-dessous.

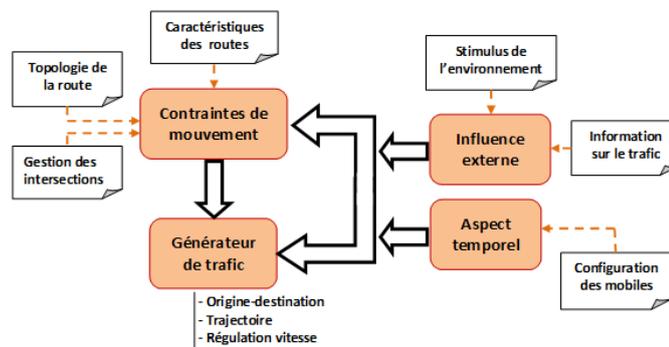


FIGURE 1.6 – Blocs fonctionnels d'un modèle de mobilité.

Le premier module, **contraintes de mouvement**, décrit les contraintes de mouvement à partir desquelles sont déterminés les déplacements autorisés pour les véhicules. Ces contraintes prennent en compte la topologie de la route et tous les paramètres qui influencent le mouvement des véhicules sur cette topologie dont, la politique de gestion des intersections, la limitation de vitesse, les sens interdits, les fonctionnalités multivoies et également l'effet des pôles attracteurs. La topologie de la route peut être aléatoire, définie par l'utilisateur ou extraite à partir de cartes réelles. Dans ce dernier cas, des bases de données telles que TIGER¹⁴ ou GDF¹⁵ peuvent être utilisées. TIGER/Line (*Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing*) est une base de données numérique décrivant les objets géographiques de tous les Etats-Unis, tels que les routes, les rails, les rivières, les lacs et les frontières politiques. GDF (*Geographic Data Files*) est un standard européen pour décrire les routes et les informations associées. En France, ce type d'information est fourni par l'institut national de l'information géographique et forestière IGN (*Information Grandeur Nature*)¹⁶.

14. <http://www.census.gov/geo/www/tiger>

15. International Standard Organization (ISO), Intelligent transport systems - Geographic Data Files (GDF), overall specification, ISO 14825 :2004, 2004.

16. <http://www.ign.fr/>

Le second module est le **générateur de trafic** qui a pour rôle de générer les véhicules et de modéliser leur mobilité en respectant toutes les contraintes de mouvement. Il consiste à générer les points origine-destination des véhicules, à déterminer, suivant un algorithme donné, l'itinéraire à suivre pour se rendre de chaque point origine à la destination correspondante, à modéliser le mouvement interne de chaque véhicule et son interaction avec les autres véhicules, à décrire les techniques de dépassement pour le changement de voies, à déterminer la vitesse de déplacement et enfin à décrire le comportement à adopter aux intersections.

Le troisième module modélise l'**aspect temporel**. Le trafic routier étant différent selon les instants de la journée et les jours de la semaine, ce module a pour rôle de décrire la configuration de la mobilité à différentes périodes d'une journée (matin, soir, heures de pointe...), et jours de la semaine (weekend, jour ouvré...). Il influence ainsi les contraintes de mouvement et le générateur de trafic.

Le mouvement d'un véhicule ne peut être configuré de façon proactive par les modèles de mobilité. La réaction du conducteur aux stimulus de l'environnement et aux données en prévenance de toute source d'information doit être prise en compte. C'est le rôle du dernier module, **influence externe**, qui permet de modéliser l'effet des phénomènes externes (accidents, travaux routiers temporaires, etc.) et la connaissance en temps réel de l'état du trafic sur les contraintes de mouvement et la génération du trafic.

1.3.3 Modèles de mobilité pour VANET

Les premiers modèles qui ont été proposés sont simplistes, ils intègrent uniquement des contraintes géographiques dans le schéma de mobilité en restreignant le mouvement des véhicules à un graphe qui représente une topologie de route donnée. Ces modèles accordent peu ou pas d'attention aux interactions entre véhicules. Parmi ces modèles, City Section [Jaap *et al.*, 2005], Manhattan [Bai *et al.*, 2006] et Obstacle Mobility Model [Jardosh *et al.*, 2003] sont proposés pour les environnements urbains et Freeway [Bai *et al.*, 2006] est proposé pour la mobilité en autoroute. La topologie de la route est définie par l'utilisateur et les points origine-destination sont déterminés de manière aléatoire. Dans tous les modèles, la trajectoire est soit pré-calculée par un algorithme de plus court chemin [Jaap *et al.*, 2005] et [Jardosh *et al.*, 2003] soit déterminée pas-à-pas en choisissant, avec une certaine probabilité, une nouvelle direction à prendre à chaque intersection [Bai *et al.*, 2006]. Pour avoir plus de réalisme, SSM (*Stop Sign Model*) et TSM (*Traffic Sign Model*) [Mahajan *et al.*, 2006] se basent sur des topologies routières réelles tirées de la base de données TIGER/Lines auxquelles sont ajoutés des mécanismes de gestion des intersections. SSM définit à chaque intersection un signal Stop qui oblige le véhicule à s'arrêter. Ce comportement est irréaliste étant donné qu'il est impossible de trouver une région avec

des signaux d'arrêt à chaque intersection. Par conséquent, les mêmes auteurs ont proposé TSM. Dans ce modèle, les signaux d'arrêt sont remplacés par des feux de signalisation. Lorsqu'un véhicule atteint une intersection, il détermine avec une certaine probabilité si le feu est rouge. Si tel est le cas, le véhicule ainsi que ceux qui le suivent s'arrêtent à l'intersection pour une durée aléatoire. Dans le cas contraire, le véhicule poursuit son mouvement. L'inconvénient de TSM est que la modélisation des interactions entre véhicules est très basique, elle permet uniquement d'éviter les collisions. Le tableau 1.1 présente une synthèse des caractéristiques de l'ensemble des modèles.

Modèle	Environnement	Topologie	Gestion des intersections	Origine-Destination	Itinéraire
Manhattan	Urbain	Utilisateur	Non	Aléatoire	Pas-à-Pas
Freeway	Autoroute	Utilisateur	–	–	–
Obstacle mobility model	Urbain	Utilisateur	Non	Aléatoire	Court chemin
City Section	Urbain	Utilisateur	Non	Aléatoire	Court chemin
SSM	Urbain	Réelle	Signe Stop	Aléatoire	Court chemin
TSM	Urbain	Réelle	Feux	Aléatoire	Court chemin

TABLE 1.1 – Caractéristiques des premiers modèles de mobilité pour véhicules.

Des modèles plus élaborés qui intègrent plus ou moins les quatre modules fonctionnels présentés par la figure 1.6 ont été proposés. Nous présentons ces modèles en distinguant les générateurs de trafic des simulateurs de mobilité. Les simulateurs de mobilité sont des modèles définis spécifiquement pour les réseaux véhiculaires alors que les générateurs de trafic ont été créés pour le domaine de transport et de l'ingénierie civile. La plupart d'entre eux ont été développés pour analyser la mobilité des véhicules, tant au niveau microscopique qu'au niveau macroscopique avec un très haut degré de détail. Tous fournissent une précision qui n'est pas atteinte par un simulateur de mobilité.

A. Simulateurs de mobilité

– **STRAW**. *Street Random Waypoint* [Choffnes & Bustamante, 2005] est un modèle de mobilité développé pour le simulateur des réseaux sans fil SWANS (*Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator*) [Barr *et al.*, 2005]. Le modèle utilise une topologie routière extraite de la base de données TIGER/Lines à laquelle il ajoute des intersections. Les routes sont bidirectionnelles avec une voie dans chaque direction. Chaque route correspond à un segment qui connecte deux intersections. Le modèle est essentiellement composé de trois modules : un module pour la gestion de la mobilité intra-segment, un module qui définit le mécanisme de contrôle de la circulation aux intersections et un troisième module pour

le calcul des itinéraires. La mobilité intra-segment est modélisée par la technique du car following. 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. Les intersections sont régulées soit par les signaux stop soit par les feux de signalisation, ceci dépend de la classe des routes qui se rejoignent à l'intersection. L'itinéraire est déterminé par le dernier module soit de manière aléatoire ou suivant un algorithme du plus court chemin.

– **VanetMobiSim.** VanetMobiSim [Fiore *et al.*, 2007] est une extension du modèle CanuMobiSim¹⁷ développé dans l'objectif de fournir un haut degré de réalisme dans la simulation spécifique de la mobilité des véhicules en tenant compte à la fois des deux aspects macroscopique et microscopique de la mobilité. Au niveau macro-mobilité, le modèle tient compte de la topologie routière, de la structure des routes (unidirectionnelles, bidirectionnelles, nombre de voies...), des caractéristiques de la route (limitations de vitesse, restrictions fondées sur la classe des véhicules...), des panneaux de signalisation (panneaux d'arrêt, feux de circulation...) et également de la présence de pôles attracteurs et leur effet sur les mouvements des véhicules. Les topologies routières peuvent être extraites de GDF, de la base de données TIGER, définies par l'utilisateur ou générées aléatoirement. Les points origine-destination peuvent être définis par l'utilisateur, déterminés de manière aléatoire, ou à partir de séries d'activités associées aux véhicules. En outre, l'itinéraire utilisé pour le déplacement est également configurable, il correspond soit au plus court chemin en termes de distance, de vitesse limite des routes ou en termes de densité des véhicules sur les routes. Au niveau microscopique, VanetMobiSim utilise des variantes du modèle du car following IDM (*Intelligent Driving Model*) pour la modélisation de l'interaction du conducteur avec son environnement. IDM-IM (*IDM with Intersection Management*) est défini pour simuler les interactions entre les véhicules et entre les véhicules et les feux de signalisation aux intersections et IDM-LC (*IDM with Lane Changing*) pour la simulation des changements de voies.

– **MMTS.** *Multi-agent Microscopic Traffic Simulator* [Raney *et al.*, 2002] est un simulateur de trafic multi-agent développé à l'ETH Zurich pour la simulation du trafic public et privé dans toute la Suisse. Il simule le comportement d'un grand nombre de véhicules, chacun modélisé par un agent intelligent autonome. Les individus sont répartis sur les villes et les villages en fonction de données statistiques recueillies par le recensement. La mobilité est simulée sur les 24 heures de la journée en affectant aux individus des activités (partir au travail le matin, courses...) définies en fonction de leurs besoins et de l'environnement. Le réseau routier utilisé dans MMTS a été initialement défini pour les autorités de planification.

17. <http://canu.informatik.uni-stuttgart.de/mobisim/>

tion régionale en Suisse. Les principaux attributs de chaque segment de route sont le type, la longueur, la vitesse limite et la capacité. MMTS ne définit aucun mécanisme de contrôle aux intersections. Les itinéraires sont calculés suivant un algorithme du plus court chemin qui tient compte de la congestion des routes. Le changement de voies est pris en compte par le modèle et les interactions entre véhicules sont modélisées par les automates cellulaires¹⁸.

– **UDEL.** UDel [UDel, 2009] est un ensemble d’outils pour la simulation des réseaux maillés et des réseaux véhiculaires qui implante plusieurs modèles de propagation et un modèle de mobilité qui appartient à la catégorie des modèles développés à partir d’enquêtes de déplacement. Ce modèle se base sur des données d’enquêtes issues d’un certain nombre de domaines de recherche, notamment, l’étude de l’emploi du temps réalisée par le bureau des statistiques de travail des Etats-Unis (*US Bureau of Labor Statistics*), l’étude de l’emploi du temps réalisée par des équipes de recherche au niveau des entreprises et, l’étude de la mobilité des piétons et des véhicules réalisée pour la planification urbaine. Le simulateur utilise ces données dans la modélisation des activités journalières des individus, départ au travail, pauses déjeuner, courses, etc. Concernant le trafic véhiculaire, UDel simule deux types de déplacements, les véhicules qui traversent la zone de simulation, les véhicules qui rentrent ou sortent de la zone de simulation. Les déplacements internes à la zone de simulation ne sont pas pris en compte. Au niveau macro-mobilité, le modèle extrait la topologie de la route à partir de données géographiques sur la ville à simuler. Les points origine-destination sont définis de manière pseudo-aléatoire en fonction des activités et les itinéraires de manière aléatoire car le véhicule choisit la direction à prendre au niveau de chaque intersection. Au niveau microscopique, la vitesse est régulée selon la technique du car following avec possibilité de changement de voies.

B. Générateurs de trafic

– **CORSIM.** *Corridor Simulation* [CORSIM, 2010] est un simulateur très largement utilisé dans les STI. C’est un logiciel commercial puissant pour la simulation de trafic développé par le département américain des transports et l’US FHWA (*Federal Highway Administration*). CORSIM est un modèle de simulation microscopique conçu pour simuler la mobilité dans les autoroutes et les routes urbaines. Il intègre plusieurs mécanismes dont le changement de voies, l’accélération et la décélération, le car following, le calcul des points origine-destination, le contrôle aux intersections, etc. Le simulateur est développé à partir

18. Dans les modèles à automates cellulaires la route est divisée en cellules de taille identique, à chacune est associé un booléen qui indique si la cellule est vide ou contient un véhicule. Le temps est discrétisé en unités, à chaque étape le véhicule peut avancer vers la prochaine cellule si elle est libre ou rester sur place dans le cas contraire. Il peut également avancer de plusieurs cellules. La vitesse du véhicule est calculée à chaque étape en fonction du nombre de cellules sur lesquelles il avance et de la taille des cellules.

de deux programmes distincts : NETSIM, un simulateur de routes urbaines et FRESIM un simulateur de routes expresses et d'autoroutes inter-états. CORSIM combine ces deux simulateurs pour fournir un simulateur complet.

– **VisSim.** VisSim [VisSim, 2009] est également un simulateur de mobilité microscopique commercial, développé par PTV AG (*Planung Transport Verkehr*) en Allemagne. Il offre une grande variété d'applications en milieu urbain et autoroutier et permet aux utilisateurs de simuler des scénarios de trafic importants et complexes qui intègrent aussi bien le transport public que privé. VisSim permet la simulation de trafic multimodal qui prend en charge une grande variété de mode de transport dont les piétons, les cyclistes, les motos, les voitures, les camions, les autobus et les tramways. En outre, le simulateur fournit plusieurs méthodes pour configurer le comportement des véhicules et intègre plusieurs mécanismes dont le changement de voies, l'accélération et la décélération, le contrôle aux intersections, etc.

– **PARAMICS.** Développé et commercialisé par *Quadstone Limited*, une société britannique, PARAMICS [PARAMICS, 2008] est une suite de modules de simulation de trafic microscopique dont un modèleur, un estimateur, un processeur, un analyseur, un programmeur et un moniteur. Le modèleur constitue le cœur de PARAMICS, il fournit les fonctionnalités fondamentales pour la configuration du modèle de mobilité, la simulation et la visualisation du trafic et la génération des statistiques. Il utilise trois modèles pour définir le comportement des véhicules. Le premier modélise les déplacements en file des véhicules (car following), le second la distance inter-véhicule et le dernier le changement de voies. En plus des fonctions habituelles mises en vigueur dans les réseaux urbains et autoroutiers tels les feux de signalisation, le modèleur peut également gérer des signaux à messages variables, les systèmes de transports publics, les parkings, les incidents, etc.

– **SUMO/MOVE.** Le logiciel ouvert SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) [SUMO, 2007] est le simulateur de trafic gratuit le plus communément utilisé dans les récents travaux de recherche sur les réseaux véhiculaires. C'est un simulateur hautement portable capable de fournir des schémas de mobilité précis. Il prend en compte plusieurs types de véhicules, les feux de signalisation, les intersections avec priorité (priorité à droite par exemple), le changement de voies, les connexions de voie à voie, etc. SUMO utilise le modèle du car following Krauss Model pour simuler le comportement des conducteurs et Random Waypoint pour le mouvement sur les routes. Pour définir la topologie de la route, SUMO intègre des analyseurs pour différents formats notamment TIGER et SIG Arcview. En 2007, MOVE (*MObility model generator for VEhicular networks*) [Karnadi *et al.*, 2007] a été proposé

comme une extension à SUMO qui ajoute une interface graphique permettant aux utilisateurs de décrire les cartes et de définir les mouvements des véhicules. MOVE comprend également un outil de visualisation qui permet aux utilisateurs de visualiser les traces de mobilité générées. MOVE permet également de convertir les traces générées par SUMO en des formats utilisables par les simulateurs ns-2 et GloMoSim.

– **CARISMA.** CARISMA [Schroth *et al.*, 2005] est un autre simulateur de trafic gratuit et réaliste développé par BMW. La topologie de route considérée est importée du standard ESRI¹⁹ à laquelle sont ajoutés des panneaux Stop aux intersections. CARISMA détermine les points origine-destination de manière aléatoire et en temps réel dans le sens où il intègre l'effet des événements externes. Le simulateur est capable de recevoir des messages du réseau qu'il utilise pour redéfinir le schéma de mobilité. La trajectoire entre les points origine-destination est calculée suivant l'algorithme du plus court chemin et le comportement des véhicules est modélisé par le modèle du car following Krauss Model. Une des limites majeures de CARISMA vient de la forme des fichiers ESRI qui ne sont pas accessibles au public et exige l'achat des produits ESRI. De plus, le changement de voies n'est pas géré par le modèle et le mécanisme de gestion des intersections est très basique.

À l'exception de quelques équipes qui ont développé des analyseurs pour extraire les informations sur la mobilité des véhicules [Yin *et al.*, 2004] et [Wu *et al.*, 2004], ou associé le simulateur de trafic à un simulateur réseau tel que FDK (*The Federated Simulations Development*)²⁰, les simulateurs de trafic n'ont pas été conçus pour la génération de traces de mouvements utilisables par les simulateurs réseaux. Par exemple, l'unique trace générée dans CORSIM est un ensemble de statistiques. Une deuxième limitation importante des simulateurs de trafic est la complexité et la lenteur de leur calibrage. Le niveau de réalisme impliqués dans la planification du trafic et du transport est si élevé que les utilisateurs potentiels ont besoin d'ajuster un grand nombre de paramètres qui influencent la mobilité générale. Ce processus est complexe, et pour la grande partie inutile dans le domaine des communications sans fil étant donné que les simulateurs de réseaux véhiculaires n'ont pas besoin d'un tel niveau de détails pour la modélisation de la mobilité [Härri *et al.*, 2009].

Les tableaux 1.2 et 1.3 présentent, respectivement, une synthèse des principales caractéristiques des modules contraintes de mouvement et générateurs de trafic des modèles de mobilité gratuits. Les générateurs de trafic commerciaux sont en général complets et intègrent des multitudes de mécanismes et de données, ils ne sont donc pas inclus dans le

19. *Environmental Systems Research Institute*, 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.

20. <http://www-static.cc.gatech.edu/computing/pads/fdk.html>

tableau.

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

TABLE 1.2 – Comparaison des contraintes de mouvement des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.

Modèle	Itinéraire	Direction aux intersections	Comportement	Vitesse	Changer de voie	O-D
STRAW	RWalk CC	Stochastique Prédéfinie	CFM	Progressive	Non	Aléatoire
VanetMobiSim	RWP CC(densité/ vitesse)	Stochastique Prédéfinie	CFM	Progressive	Oui	Aléatoire Activités P. A
MMTS	CC (con- gestion)	Prédéfinie	Automates cellulaires	Progressive	Oui	Activités
UDel	RWalk	Stochastique	CFM	Progressive	Oui	Activités
SUMO	RWalk CC CC	Stochastique	CFM	Progressive	Oui	Aléatoire Activités P. A
CARISMA	CC(densité/ vitesse)	Prédéfinie	CFM	Progressive	Non	Aléatoire

O-D : Origine-Destination, P.A : Pôles attracteurs,

CC : Court chemin, RWalk : random walk, CFM : Car Following Model

TABLE 1.3 – Comparaison des générateurs de trafic des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.

1.4 Simulation de la propagation radio dans les environnements véhiculaires

La propagation des signaux radio en environnement externe ne peut être représentée par des modèles simplistes qui supposent des espaces plats, ouverts et sans obstacles. Les objets de l'environnement, les bâtiments, les forêts, les collines, etc. causent des dégradations de la puissance des signaux transmis qui arrivent aux récepteurs avec une certaine atténuation. Cette atténuation est généralement décrite par trois modèles complémentaires qui sont le *Path loss*, le *Shadowing* (ou *slow fading*) et le *Multipath fading* (ou *fast fading*).

Le path loss représente l'affaiblissement que subit le signal en fonction de la distance parcourue par l'onde radio, avec un exposant qui dépend de l'environnement. Les modèles du path loss les plus communément utilisés sont le free space et le two-ray ground. Le Shadowing enrichit le path loss en ajoutant une composante probabiliste qui décrit la variation du path loss dans des environnements de propagation similaires. Cette variation est communément modélisée par la loi log-normale. Le Multipath fading résulte de la réception de plusieurs copies retardées et atténuées du signal ayant emprunté des trajets différents. Il est souvent modélisé par des distributions de Nakagami, Rayleigh ou Ricean.

1.4.1 Modèles communément utilisés

a- Le Free space

Le modèle en espace libre suppose le cas idéal de condition de propagation où il n'existe qu'un seul chemin en visibilité directe et dégagé entre l'émetteur et le récepteur. H.T. Friis présente la formule suivante pour le calcul de la puissance reçue par l'antenne du récepteur situé à une distance d de l'émetteur :

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

avec P_t la puissance du signal transmis, G_t et G_r qui désignent, respectivement, les gains des antennes de l'émetteur et du récepteur, L ($L \geq 1$), le facteur de perte du système et λ la longueur d'onde.

b- Le Two-ray ground

Le chemin en visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur est rarement le seul chemin de propagation. Le modèle two-ray ground considère deux chemins, le chemin en visibilité directe et le chemin réfléchi sur le sol. La puissance reçue pour une distance d est

prédite par l'équation suivante :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (1.2)$$

P_t , G_t , G_r , d et L ont la même signification que dans l'équation 1.1. h_t et h_r désignent, respectivement, la hauteur de l'antenne de l'émetteur et celle du récepteur.

L'équation ci-dessus montre une perte de puissance en fonction de la distance plus importante qu'en free space. Ce modèle donne une prédiction plus précise pour les grandes distances comparé au modèle free space. Cependant, pour de courtes distances, en raison de l'oscillation provoquée par la combinaison constructive et destructive des deux rayons, le modèle two-ray ground ne donne pas de bons résultats. De ce fait, le modèle d'espace libre est toujours utilisé en combinaison avec le two-ray ground pour les courtes distances.

c- Le Shadowing

Le free space et le two-ray ground sont des modèles déterministes dans lesquels la puissance reçue dépend uniquement de la distance. La portée de communication est représentée dans les deux modèles comme un cercle parfait autour de l'antenne émettrice. En réalité, à cause de l'effet de la propagation par trajets multiples, la puissance reçue à une certaine distance est une variable aléatoire. Le Shadowing modélise cet effet en utilisant une approche statistique pour calculer la puissance reçue. Le modèle du Shadowing est composé de deux parties. La première partie est le path loss qui prédit la puissance moyenne reçue, $\overline{P_r(d)}$, en fonction de la distance d . Il utilise comme point de référence une distance rapprochée d_0 . $\overline{P_r(d)}$ est calculée relativement à $P_r(d_0)$ comme suit :

$$\frac{P_r(d_0)}{\overline{P_r(d)}} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\beta \quad (1.3)$$

La puissance $P_r(d_0)$ peut être calculée à partir de l'équation du free space. β est appelé exposant path loss, il est en général déterminé de manière empirique par des mesures sur le terrain. Le tableau 1.4 donne quelques valeurs typiques de β . Des valeurs élevées correspondent à une plus grande obstruction et par conséquent à des atténuations plus rapides de la puissance moyenne reçue lorsque la distance augmente.

Environnement		β
Extérieur	Espace libre	2
	Zones urbaines	2,7 à 5
Intérieur	Visibilité directe	1,6 à 1,8
	Obstrué	4 à 6

TABLE 1.4 – Quelques valeurs typiques de l'exposant path loss du modèle Shadowing, β .

Le path loss est généralement mesuré en dB. A partir de l'équation 1.3 nous avons :

$$\left[\frac{\overline{P_r(d)}}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (1.4)$$

La seconde partie du modèle Shadowing est une variable aléatoire log-normale, gaussienne si mesurée en dBm, qui modélise la variation de la puissance reçue à une certaine distance. La formule générale du modèle Shadowing est :

$$\left[\frac{\overline{P_r(d)}}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + \chi_{dB} \quad (1.5)$$

avec χ une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et de variance σ_{dB} obtenue également par mesures empiriques. Des valeurs typiques de σ_{dB} sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Environnement	σ_{dB}
Extérieur	4 à 12
Bureau, séparation légère	7
Bureau, murs	9,6
Usine, visibilité directe	3 à 6
Usine obstruée	6,8

TABLE 1.5 – Quelques valeurs typiques de la variance du modèle Shadowing, σ_{dB} .

d- Le fading Ricean et Rayleigh

Ricean et Rayleigh sont des modèles stochastiques qui modélisent l'effet des trajets multiples sur la puissance reçue. Un signal transmis arrive au récepteur en plusieurs copies ayant emprunté des chemins différents et présentant des propriétés (amplitude, phase...) différentes.

Le fading de Rayleigh est utilisé pour la modélisation du fading lorsque l'émetteur et le récepteur ne sont pas en visibilité directe. Ce modèle suppose que dans ce cas, les signaux arrivent sur les différents trajets avec des angles d'incidence répartis uniformément entre 0 et 2π , l'enveloppe r du signal reçu suit alors une distribution de Rayleigh. La densité de probabilité d'une variable aléatoire r qui suit la distribution Rayleigh (σ) est :

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & \text{si } r \geq 0 \\ 0 & \text{si } r < 0 \end{cases} \quad (1.6)$$

Le fading de Rice se produit lorsque l'émetteur et le récepteur sont en visibilité directe. Dans ce cas, la puissance du signal reçue en ligne directe est beaucoup plus forte que les

puissances reçues sur les trajets indirects. Si l'on note A l'amplitude crête du signal dominant et σ le paramètre de Rayleigh caractérisant les signaux reçus par trajets multiples, alors l'enveloppe du signal reçu r suit une distribution de Rice notée $\text{Rice}(A, \sigma)$ et ayant pour densité de probabilité :

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}\right) & \text{si } r \geq 0 \\ 0 & \text{si } r < 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

avec I_0 est la fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre 0.

1.4.2 Modèles d'affaiblissement de trajet pour VANET

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur la modélisation de l'affaiblissement de trajet (path loss) dans le cadre spécifique des réseaux de véhicules. Nous présentons dans cette section quelques uns de ces travaux en distinguant les modèles théoriques des modèles issus de campagnes de mesure.

1.4.2.1 Modèles théoriques

Les modèles théoriques sont généralement définis pour la propagation en milieu urbain. Ils supposent une topologie de routes Manhattan structurée en une grille composée d'un ensemble de routes horizontales et verticales. Les obstacles sont situés dans les blocs formés par les routes. Ils sont de taille et de densité variables comme le montre la figure 1.7.

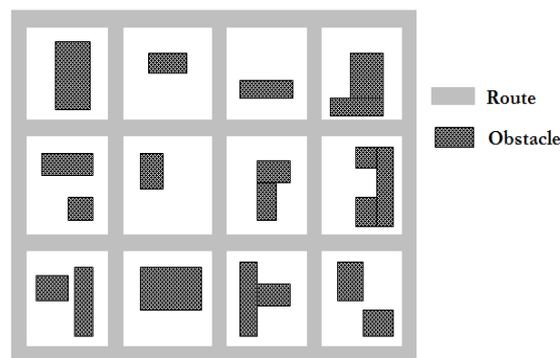


FIGURE 1.7 – Topologie de routes Manhattan communément considérée dans le calcul du path loss.

Dans [Martinez2 *et al.*, 2009] et [Nagel & Eichler, 2008] les auteurs définissent des modèles de propagation radio qui supposent une topologie de routes Manhattan. Les obstacles sont représentés dans la grille par des polygones. Dans le modèle défini par F.J Martinez

et al, si un obstacle est présent entre l'émetteur et le récepteur, le signal reçu est considéré comme nul. Dans le cas contraire, l'influence des obstacles est représentée par le PER (*Packet Error Rate*) calculé suivant l'équation linéaire suivante :

$$PER(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (1.8)$$

avec x la distance euclidienne entre l'émetteur et le récepteur. Les valeurs obtenues par régression des variables a , b , c et d sont respectivement $-4,367e-09$, $8,686e-06$, $-5,523e-3$ et 1

Dans [Nagel & Eichler, 2008], la première étape pour le calcul du path loss consiste à déterminer tous les points d'intersection entre les bâtiments situés entre les antennes émettrice et réceptrice et la droite reliant ces deux antennes. La distance, d_f , traversée par le signal en espace libre et la distance d_o traversée par le signal dans les obstacles sont par la suite déterminées à partir de l'ensemble de ces points. La formule du path loss à une distance d est la suivante :

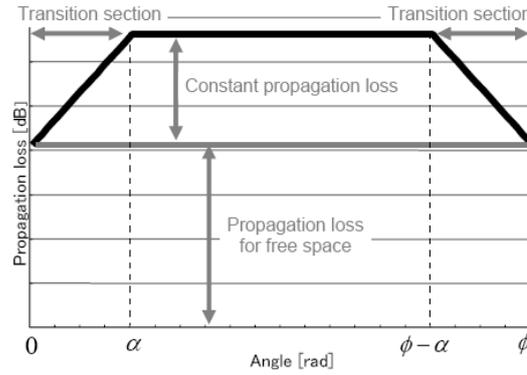
$$L_p = L_0 + 10 \cdot \begin{cases} \alpha_f \log_{10} d & d \leq d_f \\ \alpha_f \log_{10} d_f + \alpha_o \log_{10} \frac{d}{d_f} & d > d_f \end{cases} \quad (1.9)$$

avec

$$L_0 = -20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi}$$

d est la distance entre l'émetteur et le récepteur ($d = d_f + d_o$), L_0 représente le path loss de référence calculé à la distance de $1m$ et λ la longueur d'onde. Les exposants α_f et α_o dépendent de la longueur d'onde, leur valeurs sont respectivement, $18dB/décade$ et $61dB/décade$.

Pour réduire le temps de calcul, les auteurs de [Oishi *et al.*, 2006] ont proposé un modèle du path loss qui prédit l'atténuation en fonction de la densité des obstacles au lieu d'informations détaillées et précises sur leur caractéristiques. La formule du path loss est donnée ci-dessous, elle dépend de la densité des obstacles situés entre les deux véhicules émetteur et récepteur et de la valeur de l'angle, θ , formé par le segment de route sur lequel se trouve l'émetteur et la droite qui relie les deux véhicules. Le principe du modèle est simple, lorsque la taille de θ est petite, l'influence des obstacles est moindre, l'onde se propage quasiment en espace libre. Avec l'augmentation de la taille de θ , le signal traverse plus d'obstacles et le path loss devient plus grand. Ce comportement apparaît également dans le sens inverse comme montré sur la figure 1.8.

FIGURE 1.8 – Relation entre l'angle θ et les pertes de propagation [Oishi *et al.*, 2006].

L'équation du path loss est alors :

$$L(\theta) = \begin{cases} L_0 + \frac{d.l.\theta}{\alpha} & (0 \leq \theta \leq \alpha) \\ L_0 + d.l & (\alpha \leq \theta \leq \phi - \alpha) \\ L_0 - \frac{d.l.(\theta - \phi)}{\alpha} & (\phi - \alpha \leq \theta \leq \phi) \end{cases} \quad (1.10)$$

avec

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{30}{l}$$

θ est l'angle formée par la route suivie par l'émetteur et la droite reliant l'émetteur et le récepteur, L_0 est le free path loss, d est la densité des obstacles et l est la distance entre l'émetteur et le récepteur. ϕ représente le paramètre de transition entre les formules. Il est égal à $\pi/2$ lorsque l'émetteur se trouve sur une intersection et π sinon.

Dans [Giordano *et al.*, 2010] les auteurs présentent le modèle CORNER qui implante les formules analytiques proposées dans [Sun *et al.*, 2005] pour le calcul du path loss pour les communications micro-cellulaires en milieu urbain. Ces formules sont basées sur l'optique géométrique et la théorie de la diffraction et prennent en compte les multiples réflexions et diffraction que subit le signal à la rencontre des obstacles. Les données utilisées pour le calcul du path loss sont la topologie de la route et la position relative des véhicules communicants sur cette topologie. Dans CORNER trois scénarios d'atténuation sont distingués : LOS (Line of Sight), les deux véhicules sont en visibilité directe, le signal ne subit aucune réflexion ni diffraction, LOS1, les deux véhicules sont séparés par une seule intersection, le path loss est la somme de deux composantes, path loss du trajet réfléchi et le path loss du trajet diffracté illustré par la figure 1.9.a ; et enfin LOS2, le path loss est calculé à partir de quatre composantes : les multiples réflexions (R), la double diffraction (DD), la réflexion-diffraction (RD) et la diffraction-réflexion (DR) comme illustré par la figure 1.9.b.

L'inconvénient majeur des modèles théoriques présentés ci-dessus est qu'ils supposent

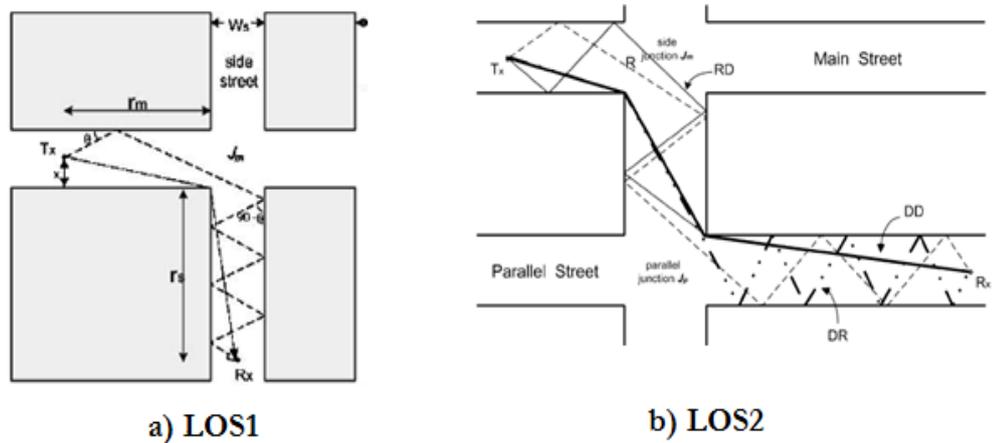


FIGURE 1.9 – Réflexions-diffractions du signal prises en charge dans CORNER.

tous des topologies de routes Manhattan. Cette structure est loin d'être représentative des topologies routières de la plupart des zones urbaines et suburbaines. De plus, ces modèles permettent de prédire la puissance reçue entre deux mobiles séparés par deux intersections au plus. Sachant que la technologie de communication préconisée pour les communications dans les réseaux véhiculaires, DSRC, permet des communications qui peuvent atteindre 1000m, plus de deux intersections peuvent être situées entre les deux mobiles communicants.

1.4.2.2 Modèles empiriques

Selon la structure et les caractéristiques des routes, le type, la nature et la densité des obstacles, quatre catégories d'environnements peuvent être distinguées pour le calcul du path loss en extérieur [Molisch *et al.*, 2009].

- *Autoroute* : elle contient deux à six voies dans chaque direction, avec généralement un mur central qui sépare les deux sens de circulation. Aucune maison n'est située dans le voisinage immédiat. La vitesse sur les autoroutes est généralement limitée entre 25 et 30m/s aux Etats-Unis, en Asie, et dans une grande partie de l'Europe, mais peut être supérieure à 40m/s en Allemagne et quelques autres pays européens. La densité du trafic est généralement élevée sur les autoroutes urbaines (jusqu'à 10000 voitures/h), mais beaucoup moins sur les autoroutes dans les zones rurales.
- *Milieu rural* : les routes sont généralement à double voies, avec peu ou pas de bâtiments sur les côtés. Les collines ou forêts de l'environnement peuvent causer une propagation par trajets multiples des signaux. La densité du trafic est généralement très faible et les vitesses sont entre 20m/s et 30m/s.

- *Milieu suburbain* : les routes sont généralement à une ou deux voies. Aux États-Unis les maisons sont souvent situées entre $8m$ à $10m$ des trottoirs alors qu'en Europe et au Japon les maisons peuvent être beaucoup plus proches des trottoirs. La densité du trafic est faible, et la vitesse est généralement limitée à $15m/s$ ou moins.
- *Milieu urbain* : il est caractérisé par des routes plus larges (deux à quatre voies), des maisons proches des trottoirs et une densité du trafic élevée. Il est à noter que les routes urbaines en Europe peuvent être très étroites et sinueuses, tandis qu'aux États-Unis, elles sont généralement plus larges et droites. Bien que les caractéristiques de l'environnement restent statiques, il est souvent utile de modéliser séparément les routes à forte densité de trafic et les routes à faible densité de trafic [Molisch *et al.*, 2009].

Les auteurs de [Mahajan *et al.*, 2007] ont défini un modèle de propagation pour milieu urbain à partir de données empiriques mesurées dans une zone de la ville de Tallahassee. La zone est composée de deux blocs, un premier bloc de $100m \times 100m$ contenant des bâtiments à trois étages et un autre bloc de $200m \times 50m$ contenant des bâtiments à un seul étage. Les estimations ont été faites sur la variation de la puissance du signal reçue par des ordinateurs placés à différents endroits de la zone. Les signaux sont émis par un point d'accès utilisant la technologie 802.11b placé sur le coin de la zone. La formule pour le calcul de la puissance du signal reçue, déduite à partir des mesures, est la suivante :

$$P_r(dBm) = P_t + A - B \log(d) \quad (1.11)$$

P_r et P_t sont respectivement les puissances du signal reçue et émise et d la distance, en mètre, entre l'émetteur et le récepteur. Le paramètre A représente le facteur constant qui modélise la réduction de la puissance causée par la présence d'obstacles dans un terrain particulier et le paramètre B , facteur de distance, traduit l'ordre de grandeur de la réduction de la puissance du signal avec la distance. L'ordre de grandeur est déterminé par la nature des obstacles. Les valeurs affectées à A et B permettent de modéliser des milieux urbains à différentes densités d'obstacles. Cependant, dans leur papier les auteurs n'ont donné aucune indication sur ces valeurs ni sur la manière dont elles peuvent être configurées.

Le modèle présenté dans [Kunisch & Pamp, 2008] est issu de mesures réalisées dans le cadre du projet NoW dans les trois types d'environnements : urbain, avec différents scénarios de mouvement des véhicules (déplacement dans la même direction, dans des directions opposées, etc.) ; rural, avec des véhicules qui se déplacent dans la même direction et enfin autoroutier. Les tests ont été réalisés en utilisant deux véhicules équipés de récepteurs GPS pour la géo-localisation et de deux antennes similaires, une qui fonctionne en mode émetteur et l'autre en mode récepteur. Les communications utilisent la bande de fréquences des $5,9GHz$ avec des canaux de $20MHz$. A partir de l'analyse des résultats, les auteurs ont

conclu que le modèle two-ray ground avec le shadowing log-normal est le plus approprié pour la prédiction du path loss en environnement rural et en autoroute. En environnement urbain, les auteurs ont retenu la loi de puissance avec le shadowing log-normal. Les formules correspondantes sont données par l'équation 1.12 pour les milieux ruraux et autoroutiers et par l'équation 1.13 pour les milieux urbains. Les valeurs des paramètres sont indiquées dans le tableau 1.6.

$$G(d) = G_{12} + \Delta G(\sigma) + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \left| \frac{\exp(-jk_0 d_-)}{d_-} + r \frac{\exp(-jk_0 d_+)}{d_+} \right| \right) \text{ dB} \quad (1.12)$$

$$G(d) = G_0 + n \log_{10} \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right) \text{ dB} + \Delta G(s) \quad (1.13)$$

avec λ la longueur d'onde, $k_0 = 2\pi/\lambda$, d_- et d_+ sont respectivement les distances du trajet direct et du trajet réfléchi et r est le coefficient de réflexion sur le sol. $\Delta G(\sigma)$ est le bruit blanc gaussien (AWGN : *Additif White Gaussian Noise*) de moyenne nulle et de variance σ .

Environnement	Two-ray ground				Loi de puissance		
	$ r $	G_{12} dB	h m	σ dB	G_0 dB	n	s dB
Rural	0,264	-9,5	1,80	2,7	-62,1	-1,79	3,3
Autoroute	0,353	-9,0	1,81	2,3	-59,7	-1,85	3,2
Urbain	—	—	—	—	-68,5	-1,61	3,4

TABLE 1.6 – Valeurs des paramètres du modèle du path loss, [Kunisch et al. 2008].

Les auteurs de [Grau *et al.*, 2009] ont proposé un modèle à partir de l'analyse des résultats obtenus dans des tests de mesure réalisés dans trois environnements : urbain, rural et autoroutier. Deux véhicules équipés du prototype IEEE 802.11p, développé dans le cadre du projet CVIS ont été utilisés dans les tests. Les mesures ont été prises en faisant varier la vitesse et la distance relatives entre les deux véhicules. Le modèle défini par les auteurs correspond à deux formules du path loss utilisant deux différents exposants γ_1 et γ_2 . La première formule est utilisée pour des distances émetteur-récepteur inférieures à une distance de référence d_c , au delà de cette distance, c'est la seconde formule qui est utilisée. La formulation est donnée par l'équation 1.14. La composante aléatoire ajoutée au path loss, $X_{(m,W)}$, modélise le shadowing représenté par la distribution Nakagami. Les auteurs justifient leur choix par le fait que dans les communications V2V, en raison de l'augmentation à petite échelle de la distance (small distance scales) et de la dominance du trajet direct, il est plus probable que le fading soit dominé par le multipath plutôt que par le shadowing. Ils définissent $X_{(m,W)}$ comme une variable statistique déterminée par le Multipath fading au lieu d'une variable aléatoire gaussienne. Les auteurs ont retenu le

modèle Nakagami qui est plus général et permet de modéliser plusieurs situations de fading comparé à Ricean et Rayleigh.

$$P_{dBm}(d) = \begin{cases} P_{dBm}(d_0) + 10\gamma_1 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{(m,W)} & d < d_c \\ P_{dBm}(d_0) + 10\gamma_1 \log_{10} \left(\frac{d_c}{d_0} \right) + 10\gamma_2 \log_{10} \left(\frac{d}{d_c} \right) + X_{(m,W)} & d \geq d_c \end{cases} \quad (1.14)$$

Dans la formule, $X_{(m,W)}$ est une variable aléatoire qui suit la distribution Gamma ayant pour paramètre de forme m et paramètre d'intensité de la composante multipath fading, W . Les valeurs des paramètres sont données dans le tableau ci-dessous.

Paramètres du modèle	Autoroute	Rural	Urbain
d_c	50m	50m	10m
Distance Maximale	80m	80m	40m
γ_1	1,544	1,323	2,656
γ_2	0,3553	0,2389	1,755

TABLE 1.7 – Valeurs des paramètres du modèle du path loss, [Grau *et al.*, 2009].

Les auteurs de [Karedal *et al.*, 2011] considèrent quatre environnements : autoroutier, urbain, suburbain et rural. Les mesures à partir desquelles est défini le modèle du path loss ont été effectuées dans la ville de Lund en utilisant deux véhicules chacun équipé d'une antenne patch et d'un récepteur GPS. Les communications utilisent la gamme des fréquences $5,2 \pm 0,12 GHz$. Les mesures ont été principalement réalisées dans des conditions de visibilité directe. Comme dans [Kunisch & Pamp, 2008], le path loss est modélisé en environnement rural par le modèle two-ray ground. Les auteurs justifient leur choix par le fait que dans un milieu rural la densité d'obstacles étant très faible, le signal subit très peu de diffusions, le trajet direct et le trajet réfléchi sur le sol sont les composantes dominantes. La formule du path loss est :

$$PL(d) = 20 \log_{10}(4\pi f_c/c) - G_{12} + X_{\sigma_1} + \zeta PL_c - Y \quad (1.15)$$

avec

$$Y = 20 \log_{10} \left| \frac{\exp\{-jk_0 d\}}{d} + \rho \frac{\exp\{-jk_0 \sqrt{d^2 + 4h^2}\}}{\sqrt{d^2 + 4h^2}} \right|$$

d est la distance émetteur-récepteur, h la hauteur de l'antenne, ρ le coefficient de réflexion sur le sol, $k_0 = 2\pi f_c/c$ avec f_c la fréquence centrale. c représente la vitesse de la lumière, G_{12} est une constante, X_{σ_1} une variable aléatoire de distribution normale à moyenne nulle et variation σ_1 . PL_c est un terme correctif ajouté au modèle pour corriger l'offset du path loss qui se produit entre deux véhicules qui se déplacent dans des sens opposés. PL_c est

additionné au path loss si les véhicules se dirigent l'un vers l'autre, ou soustrait au path loss dans le cas contraire où les véhicules s'éloignent l'un de l'autre. Pour des véhicules qui se déplacent dans le même sens, le terme est négligé. Le décalage est dû au gain combiné des antennes.

A partir des résultats obtenus, les auteurs ont conclu que la variation du signal dans le cas des autoroutes, des milieux urbains et suburbains est aléatoire en raison des obstacles. Ces derniers causent la diffusion par trajets multiples des signaux transmis dont la perte suit une loi de puissance donnée par l'équation 1.16.

$$PL(d) = PL_0 + 10n \log_{10}(d/d_0) + X_{\sigma_2} + \zeta PL_c, \quad d > d_0 \quad (1.16)$$

Avec n l'exposant path loss, PL_0 le path loss à la distance de référence d_0 égale à $10m$, X_{σ_2} est une variable aléatoire de distribution normale à moyenne nulle et variation σ_2 . PL_c et ζ ont la même signification que dans l'équation 1.14. Les valeurs des paramètres du modèle sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Loi de puissance		Two-ray ground				$\sigma_{1,2}$	PL_c
	PL_0	n	G_{12}	h	$ \rho $	$\angle\rho$		
Autoroute	63,3	1,77	–	–	–	–	3,1	3,3
Rural	–	–	7,3	2,53	0,44	-131°	2,6	2,3
Urbain	62,0	1,68	–	–	–	–	1,7	1,5
Suburbain	64,6	1,59	–	–	–	–	2,1	N/A

TABLE 1.8 – Valeurs des paramètres du modèle du path loss, [Karedal et al. 2011].

Pratiquement tous les auteurs présentent two-ray ground, avec une composante aléatoire modélisant le shadowing, comme étant le modèle le plus approprié pour la modélisation du path loss dans les environnements non obturés, ruraux selon la classification de [Molisch *et al.*, 2009]. Le modèle du path loss retenu par les auteurs pour la modélisation des variations que subit le signal radio en milieux obstrués, urbain, suburbain et autoroute, est la loi de puissance path loss avec une composante aléatoire modélisant le shadowing.

1.5 Vue d'ensemble des simulateurs de VANET

Un simulateur de réseaux VANET doit intégrer à la fois les couches protocolaires et les modèles de mobilité et de propagation radio. Deux catégories de simulateurs peuvent être distinguées selon l'approche utilisée pour leur conception.

La première catégorie est celles des nouveaux simulateurs conçus spécifiquement pour les réseaux véhiculaires intégrant la simulation des couches protocolaires et les modèles de comportement. Ces simulateurs se concentrent en général sur la modélisation de la mobilité et s'appuient sur des modèles simplistes et incomplets des couches protocolaires et de la propagation radio.

La plupart des simulateurs appartiennent à la seconde catégorie. Leur idée de base consiste à intégrer à des simulateurs réseaux existants et bien établis, tel que ns-2 et OPNET, des modèles de mobilité et de propagation radio définis pour les environnements véhiculaires. Le simulateur utilise le modèle de mobilité pour la modélisation des mouvements des véhicules. Deux modes de fonctionnement sont possibles [Härri *et al.*, 2009] : un mode centré réseau dans lequel des traces de mobilité, préalablement générées par le modèle de mobilité, sont utilisées comme données d'entrée des simulateurs de réseau permettant de définir les positions des véhicules et leur déplacement ; un mode centré application dans lequel les deux simulateurs, réseau et mobilité, fonctionnent en parallèle et s'influencent mutuellement pour modéliser l'impact des événements externes sur la mobilité. Des données issues du réseau sont transmises vers le modèle de mobilité qui adapte le comportement des véhicules en fonction et communique les nouvelles positions au simulateur réseau. Concernant la propagation radio, la plupart des simulateurs VANET ne définissent pas de modèles spécifiques aux réseaux véhiculaires mais se basent sur les modèles déjà intégrés aux simulateurs existants. Le modèle le plus communément utilisé dans les travaux de recherche est le two-ray ground.

GrooveNet. GrooveNet [Mangharam *et al.*, 2006] est un simulateur hybride de réseau et de mobilité qui permet la communication entre des véhicules simulés et des véhicules réels. Trois types de nœuds peuvent être simulés avec GrooveNet : (a) des véhicules capables de communications multi-sauts sur un ou plusieurs des canaux DSRC, (b) des infrastructures fixes, et (c) des passerelles mobiles capables de communications de véhicule à véhicule (V2V) et de véhicule-a-infrastructure (V2I). Le modèle de mobilité utilise des topologies routières importées de la base de données TIGER/Lines. Afin de représenter correctement les interactions inter-véhicules, GrooveNet intègre des modèles simples de car-following, de gestion des feux de signalisation et de changement de voie. Les points source-destination sont déterminés de manière aléatoire et les itinéraires correspondent aux plus courts chemins calculés en fonction de la vitesse sur les routes. Concernant la propagation radio, GrooveNet modélise la zone de couverture par un cercle autour de chaque véhicule simulé. D'un point de vue réseau, le simulateur intègre une variété de modèles de couches liaison de données et physique et plusieurs modèles de diffusion de messages dont le broadcasting périodique par chaque véhicule des messages sur leur position, diffusion avec priorité des messages d'urgence et d'avertissement. L'architecture modulaire de

GrooveNet permet l'ajout de nouveaux modèles de réseau, de sécurité, d'applications, et d'interactions inter-véhicules.

NCTUns. NCTUns (*National Chiao Tung University Network Simulator*)²¹ est un simulateur et émulateur réseau extensible à haute fidélité capable de simuler différents protocoles utilisés dans les réseaux IP filaires et sans fil. Initialement, NCTUns a été développé comme un simulateur réseau, mais la version la plus récente intègre des fonctionnalités pour la modélisation du mouvement des véhicules, tels que les modèles de car following, le changement de voies, le dépassement et la gestion des intersections. Une grande variété de cartes routières peut être conçue en utilisant différents types de segments de route pris en charge par le simulateur (routes à sens unique, routes à voies multiples, les carrefours, etc.). Le principal inconvénient de NCTUns est l'incorporation du code implémentant le modèle de mobilité dans le code du simulateur réseau rendant ainsi toute extension du modèle de mobilité difficile. L'effet des obstacles sur la propagation des signaux est simulé dans NCTUns simplement en diminuant ou en annulant la valeur de la puissance reçue si un obstacle existe entre les véhicules communicants.

TraNS. TraNs (*Traffic et Simulation Environment Network*)²² est quasiment le premier simulateur des VANET. C'est le premier travail qui combine un simulateur réseau, ns-2, avec un simulateur de mobilité des véhicules, SUMO. TraNs peut fonctionner selon les deux modes, centré-réseau et centré-applications. En mode centré-réseau, il n'y a pas de commentaires fournis par ns-2 à SUMO, des traces de mobilité pré-calculées sont extraites de SUMO et transmises à ns-2. Dans le mode centré-applications, la rétroaction entre ns-2 et SUMO est assurée par une interface appelée TraCI. Dans ce mode, les deux simulateurs (SUMO et ns-2) fonctionnent simultanément. TraCI réalise le lien entre ns-2 et SUMO en convertissant les commandes en provenance de ns-2 en des primitives de mobilité telles que l'arrêt, le changement de voies, le changement de vitesse qui sont envoyées à SUMO. Cependant, l'inconvénient de TraNs est que SUMO est incapable de modifier les trajectoires des voitures lorsque des obstacles imprévus apparaissent dans l'environnement tel qu'un accident de circulation par exemple. De plus, en se basant sur ns-2, TraNs utilise des modèles de propagation radio irréalistes qui ne sont pas spécifiques aux réseaux véhiculaires.

AutoMesh. AutoMesh [Vuyyuru *at al.*, 2006] est une structure de simulation réaliste pour les VANET composée d'un ensemble de modules qui contrôlent toutes les parties d'une simulation. Cette structure comprend un module simulateur réseau, un module simulateur de mobilité et un module pour la simulation de la propagation des ondes radio. Tous les

21. <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>

22. <http://lca.epfl.ch/projects/trans>

modules sont reliés entre eux par un échange d'informations afin que toute modification apportée à l'un influence les autres. Pour la simulation des protocoles réseaux, AutoMesh est développé pour utiliser le simulateur réseau ns-2 ou QualNet. AutoMesh contrôle l'exécution du simulateur réseau par des fichiers de configuration et de contrôle définis par l'utilisateur de telle sorte à le synchroniser avec le modèle de mobilité. Le module simulateur de mobilité comprend un générateur de source-destination aléatoire, un mécanisme basique de gestion des intersections et le modèle IDM pour la simulation du comportement des conducteurs. AutoMesh peut interpréter les communications entre nœuds du niveau réseau et changer le comportement des conducteurs en fonction. Le module propagation radio de AutoMesh permet d'avoir une description détaillée en 3D des objets de l'environnement à partir des données géographiques. La description peut être utilisée pour l'intégration à AutoMesh d'un modèle de propagation radio qui tient compte des effets des obstacles.

Il existe plusieurs autres simulateurs VANET qui étendent des simulateurs existants en y intégrant un modèle de mobilité dont SWANS++²³, ASH (*Application-aware SWANS*) et VGrid qui se basent sur le simulateur réseau SWANS auquel ils ajoutent l'aspect mobilité des véhicules. SWANS++ utilise le modèle STRAW pour la simulation de la mobilité, ASH et VGrid utilisent des modèles du car following pour l'interaction inter-véhicules. D'autres travaux ont été réalisés avec le simulateur OMNet++ tels que Veines (*Vehicles in Network Simulation*)²⁴ qui associe SUMO à OMNet++ via des connexions TCP qui permettent un échange de données entre les deux simulateurs et MSIE (*Multiple Simulator Interlinking Environment*)²⁵ qui adopte une approche similaire à TraNs pour connecté VISSIM au simulateur OMNet++.

1.6 Synthèse

La fiabilité d'un simulateur de réseaux de véhicules se rapporte à sa capacité à reproduire le plus fidèlement possible des situations réelles des systèmes de transport tant sur le plan trafic routier que sur le plan applicatif. L'objectif étant d'offrir des outils fiables permettant l'analyse, l'évaluation et la validation de tout nouveau standard, protocole et mécanisme avec les moindres coûts.

L'état de l'art présenté dans ce chapitre a montré que la fiabilité ne peut être garantie que par la définition de modèles de mobilité et de propagation radio qui se rapprochent

23. <http://www.aqualab.cs.northwestern.edu/projects/swans++/>

24. <http://veins.car2x.org/>

25. <http://www.cn.uni-duesseldorf.de/projects/MSIE>

le plus possible de la réalité. Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans cette direction. Les premiers modèles de mobilité qui ont été proposés ignorent les principaux paramètres qui influencent le comportement des véhicules. Ils se basent sur des contraintes simples qui permettent uniquement de limiter le déplacement des véhicules à une topologie de route donnée. Pour être plus fiables, les modèles les plus réalistes définissent les schémas de mobilité à partir d'informations supplémentaires sur la topologie de la route et les habitudes des conducteurs. La structure des routes, leurs caractéristiques ainsi que les interactions entre véhicules sont prises en compte dans la définition des mouvements des véhicules. La structure et les caractéristiques des routes sont modélisées par des contraintes de mouvements et les interactions entre véhicules par des modèles de micro-mobilité essentiellement de type *car following* et automates cellulaires. Les informations sur les habitudes des conducteurs sont utilisées pour la modélisation de la répartition du trafic. Elles sont traduites par des pôles attracteurs définis dans l'environnement et l'association d'activités à chaque conducteur. Néanmoins, la plupart des modèles se concentrent sur l'aspect mouvement et se basent sur une modélisation simple et aléatoire de la répartition du trafic. Sur l'ensemble des modèles présentés dans ce chapitre, SUMO et VanetMobiSim sont souvent présentés dans la littérature comme étant les modèles les plus réalistes puisqu'ils intègrent les principaux aspects de la mobilité des véhicules dont : les topologies de routes réelles, les mécanismes de contrôle aux intersections, le changement de voies, les activités et pôles attracteurs. Cependant, dans les deux modèles les pôles attracteurs et les activités sont définis de manière aléatoire. Ceci peut conduire à des configurations non réalistes de la répartition du trafic dans l'environnement et par conséquent à des représentations fausses de la topologie du réseau notamment la densité des véhicules par région et le partitionnement en groupes isolés de nœuds du réseau. Ces deux facteurs sont parmi les principaux paramètres qui caractérisent les réseaux véhiculaires. Les modèles qui se basent sur des données réelles tels que MMTS et UDel manquent quant à eux de réalisme dans la modélisation des mouvements. Une insuffisance commune à tous les modèles est la non prise en compte de la variabilité spatio-temporelle des schémas de mobilité. La variabilité est due d'une part aux taux de mobilité des véhicules qui diffèrent selon les périodes de la journée et jours de la semaine et d'autre part au critère dynamique des caractéristiques de l'environnement qui peuvent changer à tout moment en raison d'événements externes qui peuvent survenir tels que les accidents de la route.

Les modèles de propagation radio définis dans la littérature pour les réseaux véhiculaires manquent davantage de réalisme que les modèles de mobilité. La plupart des modèles théoriques sont proposés pour les milieux urbains et sont restreints à des topologies de routes Manhattan avec une même densité d'obstacles dans tous les blocs de la grille. Ils ne peuvent donc être utilisés pour la simulation d'environnements réels. En effet, les routes dans la plupart des villes, notamment en Europe, ne sont pas toutes structurées en

topologie Manhattan. De plus, la densité d'obstacles n'est pas uniforme dans la totalité d'une ville mais varie d'un endroit à l'autre. La seconde catégorie des modèles de propagation que nous avons présentée dans ce chapitre est celle des modèles empiriques issus de campagnes de mesures. Les modèles de cette catégorie se basent sur une classification de l'environnement en quatre milieux : urbain, suburbain, rural et autoroutier. Ils considèrent que l'impact des obstacles sur les ondes radio diffère d'un milieu à l'autre. Certains modèles utilisent une seule formule pour prédire l'affaiblissement du trajet. Les milieux sont distingués en affectant aux paramètres de la formule des valeurs qui dépendent du type du milieu. D'autres modèles définissent des formules distinctes pour chacun des milieux. La limite des modèles empiriques vient du fait qu'ils se basent sur une classification globale de l'environnement qui suppose que l'affaiblissement du signal est identique dans tout endroit d'un environnement et ne dépend que de la distance qui sépare les véhicules communicants. Cette hypothèse est erronée étant donné que dans chaque milieu la densité d'obstacles que traversent les ondes radio n'est pas toujours la même. Les véhicules peuvent être en visibilité directe s'ils sont sur la même route, séparés par peu d'obstacles comme les arbres et les petits bâtiments, séparés par de grands obstacles tels que les grands bâtiments et les collines, etc.

Dans les deux prochains chapitres nous présentons un nouveau modèle de mobilité et un nouveau modèle de propagation radio pour réseaux de véhicules. Pour répondre aux insuffisances citées précédemment concernant les modèles de mobilité, le modèle que nous définissons utilise des informations statiques et dynamiques réelles sur les caractéristiques de l'environnement et de ses infrastructures et sur les habitudes de la population. Pour être réaliste, le modèle définit les schémas de mobilité en se basant sur l'ensemble des informations. De plus, le modèle utilise des mécanismes qui permettent d'introduire à tout instant de nouvelles informations à l'environnement et de changer la configuration de la mobilité en fonction de ces informations. Le modèle de propagation proposé offre également plus de réalisme comparé aux modèles de la littérature. L'affaiblissement du trajet n'est pas prédit en se basant sur une classification globale de l'environnement mais sur des informations réelles et plus précises sur la densité et la nature d'obstacles qui séparent deux véhicules communicants.

Chapitre 2

Modèle de mobilité pour les réseaux véhiculaires

Ce chapitre est consacré à la description du nouveau modèle de mobilité pour réseaux véhiculaires, V-MBMM (*Vehicular Mask Based Mobility Model*). Ce modèle offre plus de réalisme et de flexibilité en intégrant les caractéristiques variables de l'environnement dans la définition du schéma de mobilité. V-MBMM étant inspiré du modèle MBMM (*Mask Based Mobility Model*), défini pour simuler le déplacement des individus en milieu urbain, nous commençons le chapitre par la présentation des principaux concepts et mécanismes utilisés dans MBMM. La majeure partie du chapitre est ensuite consacrée au modèle V-MBMM. Nous y présentons les principes généraux du modèle ainsi que les données et algorithmes utilisés pour simuler le déplacement des véhicules en environnement urbain et suburbain. Enfin, deux cas d'étude sont présentés : la mobilité dans la communauté d'agglomération Belfortaine (CAB) et la mobilité dans la communauté d'agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines (CASQY).

Ce travail a fait l'objet d'une publication lors de la conférence : *The Ninth International Conference on Networks, (ICN)*.

Sommaire

2.1	Le modèle MBMM	50
2.2	Le modèle V-MBMM	57
2.3	Cas d'étude du modèle V-MBMM	71
2.4	Validation du modèle V-MBMM	79
2.5	Synthèse	92

2.1 Le modèle MBMM

MBMM est un modèle de mobilité générique conçu pour simuler le déplacement des individus dans une ville. Il a été défini dans le cadre d'une thèse préparée au laboratoire SeT de l'UTBM [Joumaa, 2010]. Le modèle se base sur des données topologiques et socio-économiques pour définir un schéma de mobilité réaliste qui prend en compte l'impact variable des caractéristiques du terrain et des infrastructures urbaines sur la mobilité quotidienne des individus et groupes d'individus.

2.1.1 Caractérisation de l'environnement

L'environnement de simulation considéré dans MBMM est une grille obtenue par maillage de la carte de la ville que l'on souhaite simuler. Les mailles sont de taille identique. Les individus se déplacent sur la grille par pas de maille, allant du centre d'une maille vers le centre d'une maille voisine. Les règles de déplacement sont définies à partir de deux couches d'informations, spatiales et temporelles, ajoutées à la grille représentant la carte de la ville. Ces informations sont discrétisées au pas de maille suivant la même distribution que celle utilisée pour la carte de la ville. Le mouvement de chaque individu est déterminé en fonction du type de structure (bâtiment, commerce. . .) présent sur les différentes mailles et de la période de la journée (matin, midi. . .).

a. Caractérisation spatiale : à partir de données topographiques sur la nature du sol, qui renseignent sur le type et les caractéristiques des structures présentes dans l'environnement, les mailles sont réparties en plusieurs classes. Le tableau 2.1 présente un exemple d'une classification possible. Cette classification, comme nous le verrons plus loin est utilisée dans le calcul des pouvoirs attractifs des mailles pour les individus en déplacement.

Identifiant de la classe	Type de terrain
1	Domicile
2	Entreprise
3	Enseignement
4	Commerce
5	Gare
6	Autre

TABLE 2.1 – Exemple de classes de terrain.

b. Caractérisation temporelle : il s'agit de différencier les mailles en leur affectant des poids d'attraction qui reflètent le degré d'intérêt qu'une maille représente pour les individus. Contrairement à la classification selon la nature du sol qui est statique, l'attractivité est une

donnée dynamique qui varie au cours de la journée et des jours de la semaine. Dans MBMM, la journée est divisée en N périodes. Les poids d'attraction des mailles sont représentés par une matrice maille/vecteur d'attractivité. Chaque vecteur contient N valeurs représentant chacune le pouvoir attractif de la maille durant l'une des N périodes de la journée.

Dans [Joumaa, 2010], un cas d'étude sur la mobilité des individus dans le territoire de Belfort a été présenté. Les données sur lesquelles est basé le modèle de mobilité sont fournies dans le cadre du projet *Territoire Mobile* réalisé à l'UTBM et labellisé par le pôle *Véhicule du futur*¹. Elles englobent des informations topographiques et socio-économiques concernant la mobilité des individus dans le territoire. Ces informations sont collectées sur plusieurs jours (jours de semaine, weekends, périodes scolaires et périodes de vacances) par divers organismes. Les données utilisées dans MBMM proviennent de l'opérateur téléphonique *Orange*, concernant l'utilisation de la téléphonie mobile dans le territoire de Belfort, de la CAB qui a fourni des données géographiques sur le territoire et du SMTC de Belfort (*Syndicat Mixte des Transports en Commun*) qui a fourni des données de mobilité sur les transports en commun.

Les vecteurs d'attractivité sont déterminés à partir de : (i) la classification des mailles qui modélise l'influence des structures sur la mobilité ; (ii) les données sur la charge des stations de téléphonie mobile à partir desquelles sont déduits les taux de présence des individus sur les mailles, ces données sont discrétisées au quart d'heure. Chaque vecteur contient 72 valeurs chacune représentant le pouvoir attracteur d'une maille durant un quart d'heure de la journée, allant de 6h00 du matin à 23h45.

2.1.2 Principe du modèle

Le tableau 2.2 présente l'ensemble des données utilisées dans le modèle pour la définition des règles de déplacement. Ces données sont soit communes à tous les individus simulés soit propres à chacun d'entre eux.

a) *Masque de déplacement*

Le concept de masque dans MBMM correspond au champ de vision de l'individu dans la grille. Il est constitué de la maille sur laquelle se trouve l'individu et des 8 mailles qui lui sont adjacentes.

A chaque étape, l'individu peut choisir de rester sur place ou de se déplacer vers l'une des mailles adjacentes. La nouvelle direction est déterminée en fonction d'une chaîne de Markov à neuf états. Chaque état correspond à une direction possible décrite par la figure 2.1. La probabilité, P_{ij} , de transition d'un état i à l'état j représente la possibilité de se

1. <http://www.youtube.com/watch?v=xUTgraID07w>

Donnée	Utilisation	Type
Attractivité des lieux	Modélisée par le masque de déplacement composé des mailles (avec leurs poids d'attraction respectifs) éligibles pour le déplacement d'un individu.	Individuelle
Structures objectifs	Modélisées par les pôles attracteurs qui constituent les objectifs potentiels des individus.	Commune
Multi-modalité et vitesse limite	Modélisées par un vecteur de coefficients associé à chaque maille qui spécifie la vitesse maximale autorisée par mode de transport.	Commune
Profil de l'individu	Modélisé par un vecteur de coefficients associé à chaque maille qui spécifie le poids d'attraction de la maille pour chaque profil.	Commune

TABLE 2.2 – Données utilisées dans le modèle MBMM

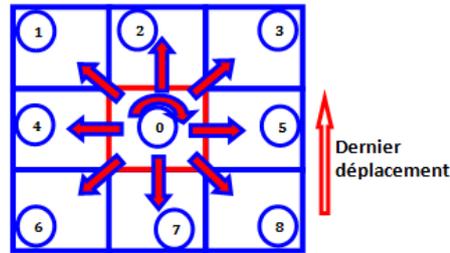


FIGURE 2.1 – Directions de déplacements possibles dans le masque.

déplacer de la maille i vers la maille j . Elle est calculée en divisant le poids d'attraction de la maille j par la somme des poids d'attraction des mailles du masque comme suit :

$$P_{ij} = \frac{Poids_j}{\sum_{k=1}^9 Poids_k}$$

La matrice de transition T est alors :

$$T = [P_{ij}]_{3 \times 3}$$

Dans la réalité, les individus ont tendance à se déplacer dans un même sens et changent rarement de direction. Ceci se traduit sur le masque par des déplacements fréquents vers les mailles situées dans la même direction que celle du précédent déplacement. Sur l'exemple de la figure 2.1, l'individu aura tendance à aller vers l'une des trois mailles supérieures (1, 2 et 3). Or, en se basant uniquement sur l'attractivité des mailles pour la sélection de la direction, des situations irréalistes telles que les retours en arrière et les arrêts fréquents peuvent se produire. Pour éliminer ces comportements, MBMM ajoute au masque un effet

mémoire qui garde trace de la dernière direction prise par l'individu ainsi que de nouvelles règles de déplacement qui sont :

- La probabilité de choisir, à l'état $i + 1$, une direction perpendiculaire à la direction choisie à l'état i est réduite d'un facteur $f1$ ($0 < f1 < 1$).
- La probabilité que l'individu reste sur place entre l'état i et l'état $i + 1$ est réduite d'un facteur $f2$ ($0 < f2 < 1$).
- Un individu en mouvement à l'état i n'est pas autorisé à revenir instantanément en arrière, arrière droit ou arrière gauche à l'état $i + 1$. Cela se fait en forçant les poids des mailles du masque situées dans ces directions à zéro.
- La dernière règle de déplacement stipule qu'un individu n'est autorisé à effectuer un retour arrière que s'il choisit d'abord de s'arrêter sur une maille. Lorsque l'individu choisit de ne pas se déplacer entre l'état i et l'état $i + 1$, tous les facteurs indiqués précédemment sont mis à 1. Ceci rend tous les déplacements de nouveau autorisés.

Pour augmenter son degré de réalisme, le modèle intègre quatre coefficients supplémentaires en plus des règles de déplacements précédentes.

b) *Pôles attracteurs*

Pour fournir une cohérence de la trajectoire à long terme, des pôles attracteurs sont définis à différentes périodes de la journée. Les 24 heures de la journée sont divisées en cinq périodes successives : travail le matin, pause déjeuner à midi, travail l'après-midi (qui peut être différent du travail du matin), loisirs le soir (dîner et sorties) et période de repos. A chaque période, plusieurs pôles attracteurs sont définis dans l'environnement (université durant la période travail, restaurant à la pause déjeuner, etc.). L'information concernant l'existence de ces pôles est ajoutée à la grille en augmentant le poids des mailles autour de chaque pôle rendant ainsi ces mailles plus attractives pour les individus selon leur profil.

c) *Vitesse de déplacement*

La vitesse d'un individu, et donc son comportement, diffère selon qu'il se déplace à pied, à vélo ou en véhicule, et selon qu'il se déplace dans une zone piétonne, sur une route, sur une autoroute, etc. Pour modéliser ce comportement, MBMM utilise des coefficients de vitesse en plus du masque. Ces coefficients sont multiplicatifs, leurs valeurs sont multipliées par les poids d'attraction des mailles du masque. A chaque maille de la grille est associé un vecteur qui spécifie les vitesses moyennes autorisées par catégorie d'individu (piéton, cycliste, véhicules...). Les coefficients de vitesse sont déterminés à partir de ce vecteur et de la vitesse courante de l'individu. Ils permettent d'inhiber certains déplacements irréalistes. La figure 2.2 et le tableau 2.3 montrent les valeurs des coefficients de vitesse qui peuvent

être attribuées à un véhicule dont la position courante est la maille a . La figure gauche indique que le mouvement précédent s'est effectué de bas en haut, et la droite en diagonale, ce qui influe sur les prochaines positions possibles selon la vitesse. A titre d'exemple, la ligne cinq du tableau 2.3 indique qu'un véhicule qui roule à 120km/h n'est autorisé qu'à aller tout droit.

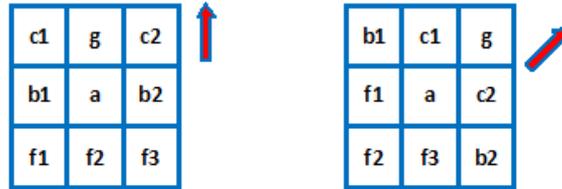


FIGURE 2.2 – Coefficients vitesse dans MBMM : cas véhicules.

Vitesse (km/h)	a	b1	b2	c1	c2	g	f1	f2	f3
20	1	1	1	1	1	1	0	0	0
50	0	1	1	1	1	1	0	0	0
90	0	0	0	1	1	1	0	0	0
120	0	0	0	0	0	1	0	0	0

TABLE 2.3 – Coefficients vitesse et déplacements autorisés : Cas véhicules

d) *Capacité des mailles*

Le nombre maximum d'individus qui peuvent se trouver au même moment sur une maille est lié à la taille de la maille, à la catégorie et à la vitesse des individus simulés. MBMM définit la capacité maximale de chaque maille en fonction de ces trois paramètres. Lorsqu'une maille atteint sa capacité maximale, aucun individu ne peut s'y rendre. Dans ce cas, le poids d'attraction de la maille est distribué sur ses mailles voisines proportionnellement à leurs poids d'attraction.

e) *Profil et Destination*

Les profils permettent de caractériser différents types d'individus ou de systèmes de transport et donc différents comportements. Par exemple, une université est plus attrayante pour les étudiants que pour les travailleurs. Les profils individuels sont gérés dans MBMM par des coefficients. Chaque maille est définie par son poids d'attraction et un vecteur de coefficients (*poids d'attraction de la maille, coef#1 pour le profil 1, coef#2 pour le profil 2, etc.*). Les valeurs finales des poids des mailles du masque sont recalculées en multipliant les poids d'attraction par le coefficient associé au profil de l'individu simulé. Cela permet

au modèle de simuler une grande variété d'applications avec différents profils d'individus. C'est l'un des points forts de MBMM. La plupart des modèles de mobilité existants ne sont en mesure de gérer qu'un profil à la fois.

La destination est l'objectif final à atteindre par l'individu. Elle correspond à une structure de l'environnement (université pour les étudiants, entreprise pour les employés, etc.) qui est déterminée à l'avance pour chaque individu en fonction de son profil. Une fois la structure choisie, il s'agit de multiplier le masque de déplacement par des coefficients de direction qui permettent de conduire plus rapidement l'individu à la zone de destination. Les coefficients sont calculés de sorte à favoriser le déplacement vers les mailles situées dans la direction de l'objectif.

2.1.3 Application aux véhicules

MBMM a été conçu dans un contexte de mobilité des piétons. Malgré le fait qu'il prenne en charge d'autres catégories de mobiles, il ne peut être directement appliqué aux véhicules. Les tests que nous avons réalisés le démontrent. La figure 2.3 montre les trajectoires, obtenues avec MBMM, pour deux véhicules se déplaçant au centre ville de Belfort dans un espace de $1500m \times 1500m$. La vitesse de déplacement est positionnée à $50km/h$, vitesse limite moyenne en environnement urbain. Les trajectoires sont choisies aléatoirement sur une population de 100 véhicules.

Nous avons observé deux comportements incorrects :

- Chaque structure de l'environnement, dont la route, est composée d'un ensemble de mailles. A chaque transition de maille, le véhicule peut se déplacer vers la maille avant, les mailles diagonales ou les mailles latérales et avoir des mouvements en zigzag. Ce comportement n'est pas réaliste étant donné que les véhicules se déplacent en suivant la courbure de la route.
- Pour faire converger l'individu vers un objectif final, MBMM affecte des valeurs d'attractivité plus élevées aux mailles en direction de la destination, à l'approche de cette destination, les véhicules ont tendance à se placer en ligne plus ou moins droite jusqu'à atteindre l'objectif. Le mouvement des véhicules étant restreint aux mailles de type route, lorsqu'il n'existe pas de routes directes vers la destination, le véhicule rentre dans une impasse d'où la formation de "pelotes" dans la trajectoire.

En plus de ces deux problèmes, le modèle ne permet pas de simuler l'aspect microscopique de la mobilité des véhicules.

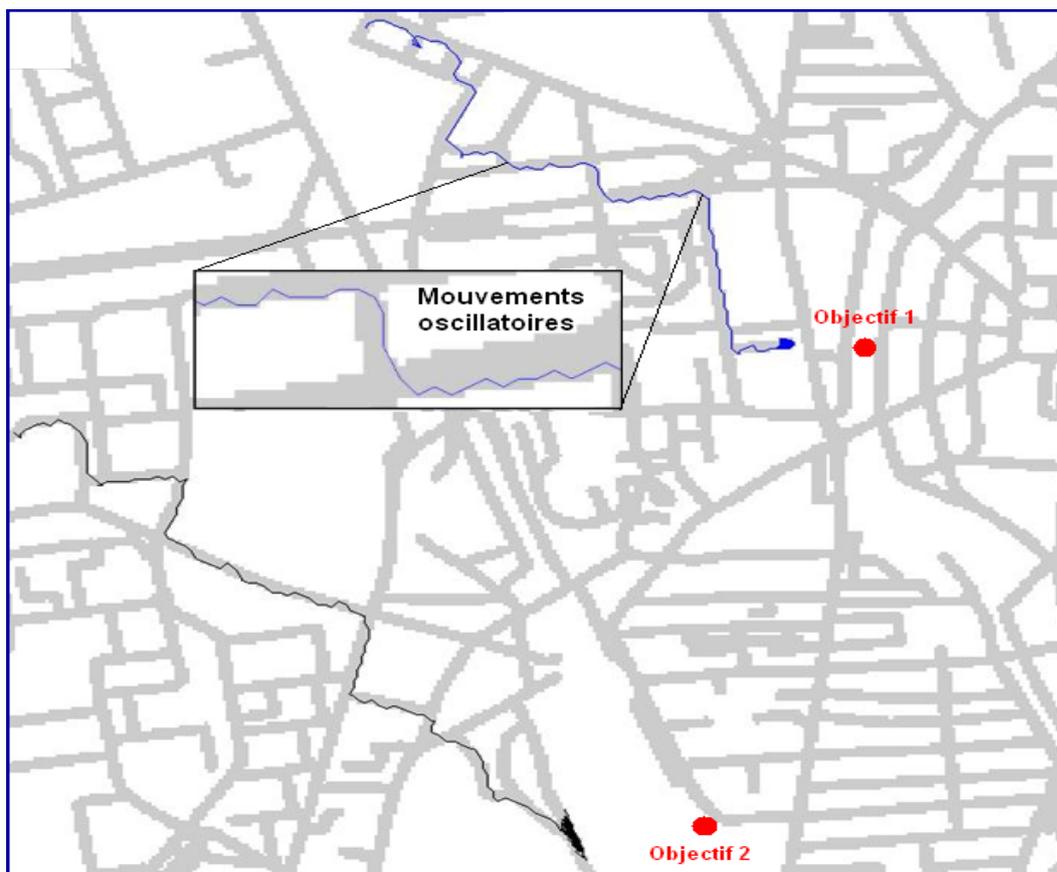


FIGURE 2.3 – Anomalies du modèle MBMM dans le cas des véhicules.

Le modèle MBMM a été testé et validé pour la simulation du déplacement des piétons en utilisant l'application développée dans le cadre du projet *Territoire Mobile*. Les résultats présentés dans la thèse de Joumaa et dans [Joumaa *et al.*, 2007] ainsi que l'étude comparative de MBMM avec les modèles de mobilité pour individus issus de la littérature [Joumaa *et al.*, 2008] ont montré qu'en captant les informations les plus pertinentes sur l'environnement et en considérant l'impact variable de ces informations sur le comportement des individus, MBMM permet de reproduire le mouvement des individus avec un très bon degré de réalisme.

Nous nous sommes basé sur les aspects et l'approche utilisés dans MBMM et nous avons défini un nouveau modèle V-MBMM pour la simulation de la mobilité des véhicules dans des milieux urbains et suburbains. Les points forts qu'il faut retenir de MBMM sont :

1. ***Prise en compte de l'environnement***

En se basant sur des données décrivant les caractéristiques des infrastructures et la présence réelle des individus dans l'environnement, le modèle définit une répartition

de la population plus réaliste.

2. *Dynamacité spatiale et temporelle*

L'impact de l'environnement sur le comportement et le déplacement des individus n'est pas statique mais varie périodiquement au cours de la journée pour modéliser les différents scénarios que l'on peut observer dans la vie quotidienne.

3. *Flexibilité*

L'intégration d'un aspect aléatoire et le calcul pas-à-pas, et non préalable, de la trajectoire permettent de modéliser l'effet de tout phénomène qui peut survenir et changer le schéma de mobilité.

4. *Généricité*

Par un simple paramétrage, il est possible de modéliser plusieurs catégories de mobiles. Dans le cas des réseaux véhiculaires, les catégories peuvent être les véhicules particuliers, les bus, les vélos, etc.

2.2 Le modèle V-MBMM

A l'instar des modèles de mobilité pour véhicules, V-MBMM simule le déplacement sur un graphe qui représente les routes. Le mouvement des véhicules est déterminé en fonction de trois principaux paramètres qui sont : la topologie des routes, les caractéristiques des infrastructures et l'attractivité variable des zones. L'apport de V-MBMM par rapport aux modèles existants se situe sur deux niveaux : réalisme et simulation.

D'un point de vue réalisme, V-MBMM est à notre connaissance le premier modèle qui prend en compte l'impact variable des infrastructures sur la mobilité des véhicules. De plus, et comme nous allons l'expliquer plus en détail par la suite, en déterminant la trajectoire pas-à-pas, le modèle est capable de reproduire l'effet en temps réel des phénomènes externes sur la mobilité.

D'un point de vue simulation, le modèle est paramétrable. Le schéma de mobilité est déterminé à partir d'un ensemble de paramètres sur les routes, des caractéristiques du terrain et de l'attractivité des lieux. Ces paramètres peuvent prendre des valeurs par défaut ou être positionnés à partir de données réelles. Ceci permet de simuler la mobilité en considérant des environnements simplifiés définis par l'utilisateur ou encore des environnements plus complexes représentant des cartes de villes réelles avec toutes les données associées.

Remarque. Nous utiliserons, dans le reste de ce chapitre, indifféremment les notions de individu, véhicule et mobile pour désigner un véhicule particulier.

2.2.1 Principaux mécanismes

La figure 2.4 montre les deux parties qui composent le modèle de mobilité. La *partie données* englobe l'ensemble des données sur les caractéristiques de l'environnement, la topologie des routes et les flux de déplacement. Ces données sont utilisées par la *partie traitement* pour la détermination des points origine-destination, le calcul de la trajectoire, la régulation de la vitesse et le changement de voies. Les flux de déplacement (flux de mobilité, périodes de mobilité et profils des mobiles) étant déterminés à partir d'un ensemble de calculs, ils font également partie des traitements.

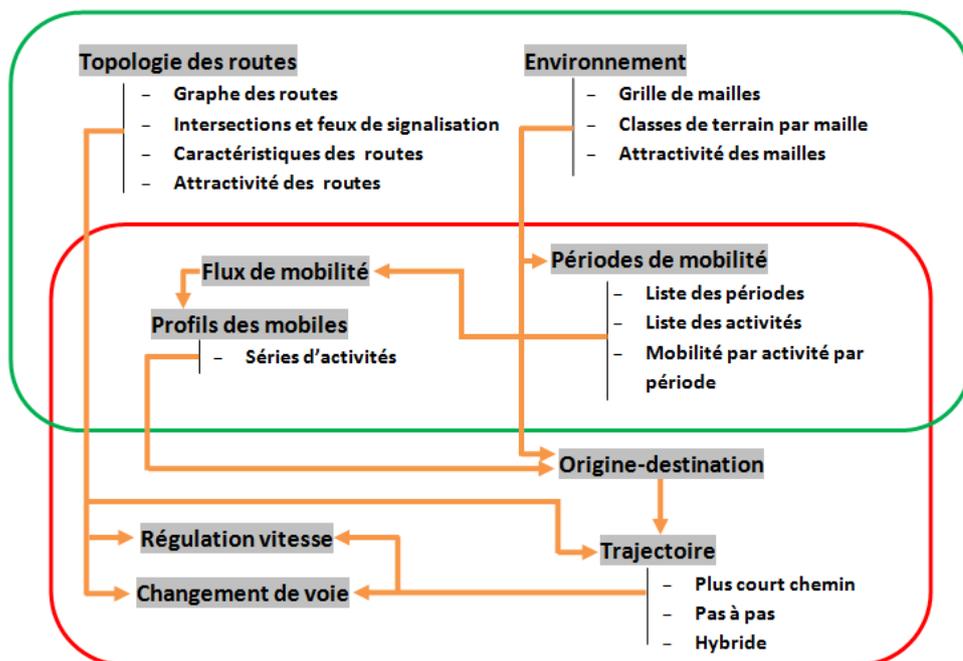


FIGURE 2.4 – Parties données et traitements du modèle V-MBMM.

2.2.1.1 Caractérisation de l'environnement

L'environnement de simulation est décrit de la même manière que dans MBMM, il comprend :

- Un découpage en mailles de taille égale de la carte géographique représentant l'environnement.
- Une caractérisation spatiale des mailles qui consiste à associer à chacune une classe de terrain représentant le type de structures présent sur la maille.
- Une caractérisation temporelle selon laquelle la journée est divisée en périodes. A chaque maille est associé un vecteur d'attractivité de taille égale au nombre de péri-

odes de la journée. Chaque valeur d'attractivité reflète le degré d'intérêt qu'une maille représente pour les individus durant une période.

2.2.1.2 Topologie des routes

La topologie des routes sur lesquelles se déplacent les véhicules est représentée par un graphe pondéré orienté $G(R, I, S, A, PA)$:

- *L'ensemble R des segments de Route* : c'est l'ensemble des arêtes du graphe, chaque élément de R correspond à un segment de route qui relie deux intersections. Un segment a la forme d'une ligne droite ou d'une ligne courbée modélisant les virages. Nous adoptons la notation suivante :
 r : désigne un segment de route indépendamment de son orientation.
 r_{ij} : désigne le segment de route qui relie l'intersection i à l'intersection j .
- *L'ensemble I des Intersections* : il correspond aux sommets du graphe. Chaque élément de I représente une intersection qui connecte trois, ou plus, segments de route.
- *L'ensemble S des panneaux de Signalisation* : il contient les panneaux de signalisation présents sur les routes. Seuls les feux de circulation, placés au niveau de chaque intersection sont considérés dans V-MBMM, mais d'autres signalisations peuvent être ajoutées.
- *L'ensemble A des Attributs* : chaque élément de A est associé à un segment de route. Il représente l'ensemble des attributs du segment qui sont : sa longueur, sa vitesse limite, le nombre et la direction des voies. Lorsque les caractéristiques de la route sont inconnues, les attributs peuvent être positionnés par l'utilisateur ou prendre des valeurs par défaut définies dans le modèle. Ces valeurs sont représentées dans le tableau 2.4.

Attribut	Valeur
Longueur	Aléatoire
Vitesse limite	Urbain : 50km/h Suburbain : 80km/h
Nombre de voies	2
Direction des voies	Double

TABLE 2.4 – Valeurs par défaut des attributs des routes.

- *L'ensemble PA des Poids d'Attraction* : la journée est divisée en N périodes $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$. Les mêmes périodes que celles utilisées pour l'attractivité des mailles. Chaque élément de PA est associé à un segment de route. C'est un vecteur $[PA_1, PA_2, \dots, PA_N]$ de N valeurs représentant les poids d'attraction du segment durant les N

périodes de la journée. Les poids d'attraction sont calculés à partir de données sur le déplacement ou la présence des véhicules dans l'environnement simulé. Ils peuvent être déduits à partir de traces de mobilité, d'enquêtes de déplacement ou d'autres sources d'information. Lorsque ces données ne sont pas renseignées, les poids d'attraction de toutes les routes sont positionnés à 1 sur toutes les périodes de la journée.

2.2.1.3 Détermination Origine-Destination

Dans V-MBMM, le découpage de l'environnement en mailles est utilisé pour la détermination des points origine-destination des véhicules, contrairement à MBMM qui se base sur ce découpage pour la détermination des mouvements élémentaires des individus. Les points origine-destination sont définis à partir des valeurs d'attractivité des mailles et des profils de mobilité.

Les **profils de mobilité** permettent de caractériser les tendances de mobilité intrinsèques aux différentes classes socioprofessionnelles des individus. Ces tendances sont définies par un ensemble d'activités associées à chaque classe. La notion d'activité a été introduite dans [Feeley *et al.*, 2004] que les auteurs définissent comme étant le processus selon lequel l'individu se déplace vers un pôle attracteur puis reste sur place. Dans la plupart des modèles définis dans la littérature, les deux classes socioprofessionnelles les plus largement considérées sont *étudiant* et *employé* ; l'étudiant étant plus attiré par les établissements d'enseignement et l'employé par les entreprises.

Afin de pouvoir modéliser plusieurs catégories d'individus (étudiant, employé, retraité, sans profession...), les activités sont définies dans V-MBMM indépendamment des classes socioprofessionnelles. Une activité correspond à un déplacement d'un point origine vers un point destination. Elle est définie par la paire (Structure origine, Structure destination).

Le tableau 2.5 illustre quelques unes des activités déterminées à partir des classes de terrain présentées dans le tableau 2.1. Dans un environnement à M classes de terrain, $M \times M$ activités peuvent être simulées.

Numéro activité	(Structure origine, Structure destination)
1	(Domicile, Domicile)
2	(Domicile, Entreprise)
3	(Domicile, Enseignement)
4	(Enseignement, Domicile)
5	(Enseignement, Entreprise)
...	

TABLE 2.5 – Exemple d'activités (Structure origine, Structure destination).

Les déplacements quotidiens des individus ne sont pas aléatoires et peuvent être représentés par des modèles simples. L'approche utilisée dans V-MBMM consiste à définir l'ensemble des activités qui peuvent se produire le long d'une journée et à déterminer à partir de cet ensemble les déplacements des individus.

La journée est tout d'abord divisée en plusieurs périodes représentant les différents scénarios que l'on peut observer durant une journée : départ au travail le matin, pause déjeuner à partir de 11h45, retour au travail à partir de 13h30, etc. A chaque période sont associés : (i) un taux de mobilité représentant le pourcentage, sur une population, des mobiles qui se déplacent durant la période ; (ii) une loi de distribution qui représente la répartition de la mobilité durant la période (croissante, décroissante, uniforme, etc) ; (iii) la liste d'activités qui peuvent se produire durant la période avec le taux de mobiles par activité. Le tableau 2.6 présente un exemple des périodes que l'on peut distinguer dans une journée travaillée avec les principales activités et loi de distribution associées à chacune.

Tranche horaire	Niveau de mobilité	Principales activités	Loi de distribution
00h00-07h15	Quasi nul	Départ du domicile à la fin de la période	Croissante
07h15-09h15	Fort	Départ du domicile vers le lieu de travail, principalement entreprise et enseignement	Normale
09h15-11h45	Moyen	Diverses activités qui peuvent être départ vers les commerces, retour au domicile, etc.	Uniforme
11h45-12h30	Fort	Sortie du lieu de travail vers le domicile ou les commerces (incluent les restaurants)	Croissante
12h30-13h30	Moyenne	Similaire à la période de 09h15-11h45	Uniforme
13h30-14h15	Fort	Retour du domicile ou des commerces vers le lieu de travail	Croissante
14h15-16h00	Moyen	Similaire à la période de 09h15-11h45	Uniforme
16h00-18h30	Fort	Sortie du lieu de travail vers le domicile ou les commerces	Uniforme
18h30-19h30	Fort	Sortie du lieu de travail vers le domicile ou les commerces	Décroissante
19h30-20h30	Faible	Sortie du lieu de travail ou des commerces vers le domicile	Décroissante
20h30-21h30	Moyen	Sortie du domicile vers les lieux de loisir et les commerces (incluent les restaurants)	Croissante
21h30-23h00	Moyen	Retour des lieux de loisir et des commerces au domicile	Décroissante
23h00-24h00	Quasi nul	Retour au domicile	Décroissante

TABLE 2.6 – Périodes et activités par période d'un jour travaillé.

a) *Points origine*

Il s'agit de définir la distribution initiale des véhicules dans l'environnement. Cette distribution dépend de l'instant t du début de la simulation et de l'attractivité des lieux à cet instant.

Pour chaque véhicule simulé, une activité, ou une série d'activités est définie. Pour simuler le mouvement de la période T_i à la période T_j ($i < j$), la première étape consiste à définir l'activité de chaque véhicule. La probabilité qu'un véhicule choisisse une activité a à la période T_i est proportionnelle au taux de mobilité de l'activité a à cette période. Les taux sont ceux définis dans la matrice des flux de déplacement. Les points origine-destination sont par la suite déterminés à partir de l'activité. En supposant que la structure origine du véhicule soit m_o , le véhicule doit être placé sur une maille de classe de terrain m_o . Sur l'ensemble des mailles de la classe m_o , les mailles ayant la plus grande attractivité, à la période T_i , ont la plus grande probabilité d'être sélectionnées pour accueillir le véhicule à son origine. La probabilité, $P(m, T_i)$, de choisir la maille m comme origine à la période T_i est égale au poids d'attractivité de m à T_i divisé par la somme des poids d'attractivité, à T_i , de toutes les mailles de la classe m_o , comme le montre la formule 2.1.

$$P(m, T_i) = \frac{PA(m, T_i)}{\sum_{n=1}^{N_{m_o}} PA(n, T_i)} \quad (2.1)$$

avec N_{m_o} le nombre de mailles qui appartiennent à la classe m_o .

Une fois la maille sélectionnée, le véhicule sera placé sur le segment de route le plus proche de la maille.

Une maille qui atteint sa capacité maximale, qui est le nombre maximum de véhicules que la maille peut contenir, ne peut plus être sélectionnée.

b) *Points destination*

La destination est déterminée pour chaque véhicule en fonction de la structure destination m_d spécifiée dans l'activité qui lui est associée et, des pouvoirs attractifs des mailles sur toutes les périodes situées entre T_i (début simulation) et T_j (fin simulation).

A chaque maille de la classe de terrain m_d sont ainsi associées $j - i$ probabilités ; une probabilité par période. La probabilité de sélectionner la maille m comme destination à la période T_l , tel que $i \leq l < j$, est :

$$P(m, T_l) = \frac{PA(m, T_l)}{\sum_{k=i}^{j-1} [\sum_{n=1}^{N_{m_d}} PA(n, T_k)]} \quad (2.2)$$

De même que pour le point origine, une fois la maille destination déterminée, le point destination est placé sur le segment de route le plus proche de la maille.

Lorsque le véhicule atteint son objectif, il s'arrête s'il ne lui reste aucune autre activité ou détermine une nouvelle maille destination. En supposant que l'ancienne destination est atteinte à la période T_l ($i \leq l < j$) et que la nouvelle structure destination est de la classe $m_{d'}$, la nouvelle maille destination est choisie en fonction des pouvoirs attractifs des mailles de la classe $m_{d'}$ sur toutes les périodes situées entre T_l et T_j selon la formule 2.2.

Il est à noter que lorsque les données sur l'attractivité ne sont pas fournies, les points origine-destination deviennent aléatoires.

2.2.1.4 Calcul de la trajectoire

Trois approches peuvent être utilisées pour le calcul de la trajectoire entre l'origine et la destination de chaque véhicule.

a) *Trajectoire pré-calculée*

La trajectoire est calculée par l'algorithme du plus court chemin de Dijkstra sur le graphe de la route. Le résultat retourné par l'algorithme peut correspondre au plus court chemin en termes de distance, de vitesse maximale autorisée, du nombre maximum de voies, du poids d'attraction ou d'une combinaison de tous ou de quelques-uns de ces critères.

b) *Trajectoire pas-à-pas*

Pour rester dans l'esprit de MBMM, un autre algorithme basé sur la même approche que ce dernier peut également être utilisé pour le calcul pas-à-pas de la trajectoire. Le véhicule se déplace d'une intersection à l'autre en choisissant une nouvelle direction à prendre à chaque étape. Le masque définit le champ de vision du véhicule dans le graphe de routes. Il est composé de l'ensemble des routes connectées à l'intersection courante avec leur poids d'attraction respectifs. La direction est déterminée suivant une chaîne de Markov dont le nombre d'états est égal au nombre de routes connectées à l'intersection. La probabilité de transition d'un état i à l'état j représente la probabilité d'aller de l'intersection i vers l'intersection j . Elle est calculée en divisant le poids d'attraction du segment de route reliant les intersections i et j , noté r , par la somme des poids d'attraction de l'ensemble

des segments connectés à l'intersection i :

$$P_{ij}(T_l) = \frac{PA(r, T_l)}{\sum_{k=1}^{R_i} PA(k, T_l)} \quad (2.3)$$

avec T_l qui représente la période courante et R_i le nombre de routes connectées à l'intersection i .

Pour rendre le modèle plus réaliste, trois coefficients multiplicatifs sont appliqués au masque de déplacement à chaque étape :

Les **coefficients d'avancement** sont propres à chaque véhicule. Ils permettent d'inhiber les déplacements incorrects qui peuvent avoir lieu si l'on se base uniquement sur les poids d'attraction. La figure 2.6 illustre un exemple d'une section de routes avec une boucle. Les routes sont bidirectionnelles et sont pondérées par des valeurs représentant leur poids d'attraction. En s'appuyant uniquement sur les poids d'attraction, le véhicule a plus de probabilité de faire un retour arrière ou de traverser à plusieurs reprises la boucle car les segments de route sont plus attractifs. Pour éliminer ces déplacements, l'algorithme garde la trace des M dernières routes empruntées par le véhicule et détermine dynamiquement leurs coefficients suivant la formule 2.4. Ces coefficients sont croissants au cours du temps. Le coefficient de toutes les autres routes est positionné à 1. En multipliant le coefficient d'avancement par le poids d'attraction des routes, les M routes mémorisées deviennent des points de répulsion et n'attirent plus le véhicule.

$$CA(r, t) = \frac{t - t_p(r)}{t} \quad (2.4)$$

avec t l'instant courant et $t_p(r)$ l'instant de passage du véhicule par la route r .

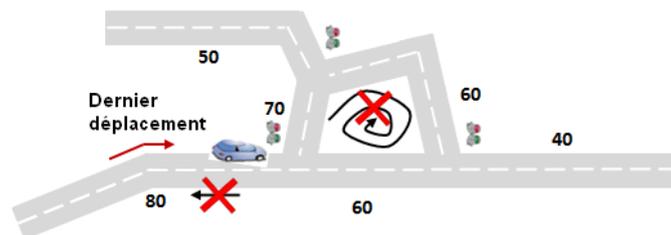


FIGURE 2.6 – Intérêt du coefficient d'avancement dans V-MBMM.

Pour guider le véhicule vers sa destination finale, un **coefficient de direction** est appliqué à chaque fois aux segments de route connectés à l'intersection courante. L'application de ce coefficient au masque augmente l'attractivité des routes qui conduisent vers la

destination finale. En supposant que l'intersection courante est i , le coefficient de direction du segment reliant l'intersection i à l'intersection j est calculé en fonction de la distance euclidienne qui sépare l'intersection j de la destination finale. A noter que la distance euclidienne peut être remplacée par le plus court chemin.

$$CD(r_{ij}) = \frac{d(j, a)}{\sum_{k=1}^{R_i} d(k, a)} \quad (2.5)$$

a étant le point destination, d la fonction qui retourne la distance euclidienne entre deux points donnés en arguments et R_i le nombre de routes connectées à l'intersection i .

Le dernier coefficient est le **coefficient de liberté** qui permet de prendre en compte le taux d'occupation des routes et de favoriser, parmi toutes les routes possibles à prendre, les moins congestionnées. Le coefficient de liberté d'une route r_{ij} reliant l'intersection courante, i , à l'intersection j est calculé en fonction du nombre de véhicules sur la route, $V(r_{ij})$, de la longueur de la route, du nombre de voies dans le sens ij et de la vitesse moyenne sur la route :

$$CL(r_{ij}) = Cap(r_{ij}) - V(r_{ij}) \quad (2.6)$$

La capacité correspond au nombre maximal de véhicules que la route peut contenir, elle est calculée comme suit :

$$Cap(r_{ij}) = \frac{l(r)S(r_{ij})}{d_{min}} \quad (2.7)$$

avec $l(r)$ la longueur de la route r , $S(r_{ij})$, le nombre de voies de la route r qui vont de l'intersection i vers l'intersection j , d_{min} est la distance minimale inter-véhicules qu'il faut maintenir sur la route r , elle dépend de la vitesse moyenne des véhicules se trouvant sur cette route.

Les coefficients liberté des routes de l'intersection sont par la suite normalisés en divisant chaque coefficient par la somme de tous les coefficients liberté des routes reliées à l'intersection.

Le poids de la route r_{ij} , à l'instant t , est calculé à partir de l'ensemble des coefficients comme suit :

$$Poids(r_{ij}, t) = \frac{PA(r, T_p)^\alpha \times CA_i(r, t)^\beta \times CL(r_{ij})^\gamma}{CD(r_{ij})^\theta} \quad (2.8)$$

avec T_p la période à l'instant t .

La probabilité de choisir, à l'instant t , la route r_{ij} de l'intersection i est calculée comme suit :

$$P(r_{ij}, t) = \frac{Poids(r_{ij}, t)}{\sum_{k=1}^{R_i} Poids(r_{ik}, t)} \quad (2.9)$$

Un pré-calcul de la trajectoire permet de faire converger rapidement le véhicule vers sa destination. Dans le cas d'un calcul pas-à-pas, le véhicule étant guidé par les poids d'attraction des routes, plusieurs segments de route peuvent être traversés de façon pseudo-aléatoire avant que ce dernier n'atteigne son objectif final. Néanmoins, l'avantage de cette approche est qu'elle permet de prendre en compte les conditions, en temps réel, de la route telle que la fluidité représentée dans notre modèle par le coefficient de liberté. De plus, en déterminant progressivement la trajectoire, l'impact des événements externes sur le schéma de mobilité peut être reproduit en ajoutant l'information concernant tout nouvel événement à l'environnement (cf. section 1.3.2, module influence externe). Il est par exemple possible de modéliser l'impact d'un accident de route en diminuant le pouvoir attractif des routes menant vers le lieu de l'accident devenant un point de répulsion qui n'attire pas les véhicules. Enfin, il permet de prendre en compte les choix stochastiques du conducteur qui ne suit pas forcément tous les jours la même trajectoire.

c) *Trajectoire hybride*

L'algorithme hybride combine l'approche du plus court chemin et l'approche pas-à-pas en tirant profit des avantages de chacune et en limitant leurs inconvénients. Pour un couple origine-destination, l'algorithme hybride consiste à :

1. Calculer le plus court chemin entre les deux points origine-destination, suivant les critères choisis par l'utilisateur. Le résultat est un itinéraire optimal de N intersections, I_1, I_2, \dots, I_N .
2. Sélectionner dans l'itinéraire un ensemble d'intersections qui vont constituer la liste des objectifs intermédiaires. Ces intersections sont choisies à intervalle régulier dans l'itinéraire. En supposant que la taille de l'intervalle est de M intersections, les objectifs intermédiaires seront les intersections I_M, I_{2M}, \dots, I_N .
3. Le premier objectif intermédiaire, I_M , sera défini comme destination vers laquelle le véhicule se déplace suivant l'approche pas-à-pas. Une fois l'objectif atteint, ce dernier devient le point origine et le prochain objectif, I_{2M} , devient la nouvelle destination

suivant l'approche pas-à-pas. L'étape 3 est répétée jusqu'à atteindre l'objectif final, I_N .

Comparée à l'approche pas-à-pas, l'approche hybride hérite de l'avantage du plus court chemin et permet de faire converger plus rapidement les véhicules vers leur destination finale. Par ailleurs, en utilisant l'approche pas-à-pas pour déterminer la trajectoire entre deux objectifs successifs, l'algorithme hybride utilise des données qui peuvent être réactualisées en temps réel, ce qui n'est pas le cas de l'algorithme du plus court chemin.

L'ensemble des mécanismes que nous avons présenté ci-dessus concernent la composante macroscopique du modèle, ils modélisent le comportement du véhicule comme une entité individuelle indépendante de toutes les autres entités et ne prennent pas en compte les règles de circulation. L'aspect microscopique est modélisé par deux modules intégrés à V-MBMM, un module pour la régulation de la vitesse et un autre module qui définit les règles pour le changement de voies.

2.2.2 Régulation de la vitesse

La vitesse d'un véhicule est définie comme étant le minimum de trois vitesses qui sont : la vitesse limite sur la route, la vitesse interne et la vitesse externe.

a. Vitesse limite sur la route : c'est un attribut de chaque segment de route ; cette donnée est soit extraite à partir d'informations réelles sur la route, soit positionnée à une valeur par défaut qui dépend du milieu que l'on désire simuler (50km/h pour les milieux urbains, 80km/h pour les milieux suburbains. ...).

b. Vitesse interne : la vitesse interne est une valeur attribuée à chaque conducteur et tirée aléatoirement dans un intervalle $[v_{min}, v_{max}]$. Elle permet de modéliser différentes catégories de conducteurs, ceux qui favorisent la conduite à petite vitesse, ceux qui conduisent à grande vitesse, etc. De plus, en affectant différentes valeurs à v_{min} et v_{max} , il est possible de simuler plusieurs catégories de mobiles tels que les voitures, les bus, les vélos, etc., ainsi que les modes de propulsion thermique, électrique, etc.

c. Vitesse externe : la vitesse externe est déterminée en fonction des feux de signalisation et de la vitesse des véhicules voisins. Elle permet de reproduire le comportement des conducteurs qui consiste à ralentir à l'approche d'un obstacle. Essentiellement, le conducteur doit ralentir lorsqu'il s'approche d'un véhicule afin de maintenir la distance de sécurité et d'éviter les collisions, et à l'approche d'un feu rouge pour s'arrêter. Pour modéliser ce comportement, le modèle IDM (*Intelligent Driving Model*) est utilisé.

Présenté par Treiber et al. [Treiber *et al.*, 2000], IDM est un modèle synthétique qui appartient à la catégorie des *car following models*. Le comportement de chaque conducteur

est caractérisé en fonction des véhicules qui le précèdent. L'accélération d'un conducteur donné est décrite par l'équation suivante :

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 - v \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

avec

$$s^* = s_0 + vT + \frac{v \Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad (2.11)$$

Dans l'équation, v désigne la vitesse actuelle du véhicule, v_0 la vitesse désirée qui représente la vitesse que le conducteur souhaite atteindre lorsque la route est libre, et s la distance qui sépare le véhicule du véhicule qui le précède. s^* est appelée « vitesse dynamique souhaitée ». Ce paramètre est calculé selon la formule 2.11, il dépend de la distance minimale pare-choc à pare-choc s_0 , du temps de réaction T , de la différence de vitesse avec le véhicule précédent Δv , et de l'accélération et de la décélération maximales, respectivement a et b .

La formule 2.10 donne l'accélération instantanée du véhicule divisée en deux termes : l'accélération souhaitée $\left(\frac{v}{v_0} \right)^4$ lorsque la route est libre et la décélération pour freinage induite par le véhicule situé devant $\left(\frac{s^*}{s} \right)^2$. Par une variation progressive de la vitesse, IDM permet une simulation réaliste des interactions entre véhicules circulant sur une même voie. Des situations courantes du monde réel peuvent être reproduites telles que les files d'attente de véhicules derrière un véhicule lent, la réduction de vitesse en présence d'embouteillages, l'accélération lorsque le trafic est fluide, etc.

Le comportement des conducteurs au niveau des intersections est également modélisé en utilisant le modèle IDM. Lorsque la distance entre le véhicule et l'intersection est inférieure à une valeur d prédéfinie, le conducteur accélère pour passer l'intersection. Dans la réalité, ceci correspond au passage au feu orange. Si la distance est supérieure à d , le comportement va dépendre de la couleur du feu de signalisation. Si le feu est vert, le conducteur accélère, dans le cas contraire, c'est-à-dire orange ou rouge, l'intersection est considérée comme un véhicule en arrêt, le véhicule décélère jusqu'à s'arrêter. Dans tous les cas, la vitesse est calculée selon l'équation 2.10.

2.2.3 Changement de voie

Nous avons défini un mécanisme simple pour le changement de voie selon lequel un véhicule ne peut changer de voie qu'au niveau d'une intersection. Lorsqu'un véhicule arrive à une intersection, il détermine la prochaine route à prendre suivant l'un des trois algorithmes de calcul de trajectoire. Si la route est à voies multiples, le véhicule choisit parmi les voies possibles celle sur laquelle il n'aura pas à décélérer. La sélection de la voie se fait selon les étapes suivantes :

- La vitesse du véhicule est comparée à la vitesse du dernier véhicule situé sur chacune des voies. Afin d’avoir des vitesses croissantes sur les voies d’une route (vitesse sur la voie v_{i+1} supérieure ou égale à la vitesse sur la voie v_i), le parcours des voies se fait dans un ordre croissant, v_0, v_1, v_2 , etc.
- Le véhicule sélectionne la première voie trouvée qui ne contient aucun véhicule ou sur laquelle la vitesse du dernier véhicule est supérieure ou égale à sa propre vitesse. Si aucune voie ne répond à ces conditions, c’est à dire que toutes les voies sont occupées et que la vitesse du dernier véhicule sur chaque voie est inférieure à la vitesse courant du véhicule, la dernière voie est sélectionnée.
- Une fois la voie choisie, le véhicule calcule sa vitesse de déplacement selon la formule 2.10.

2.2.4 Synthèse des paramètres

Paramètre	Modélisation	Type
Environnement		
Classe de terrain par maille	Type de structure présent sur la maille	Statique déterministe
Attractivité des mailles	Taux de présence des véhicules par maille	Dynamique déterministe
Graphe des routes	La topologie de routes avec les signalisations et les caractéristiques des routes	Statique déterministe
Attractivité des routes	Taux de présence des véhicules par segment de route	Dynamique déterministe
Coefficient de liberté	Taux d’occupation des routes	Dynamique stochastique
Mobile		
Origine-Destination	Les activités journalières de l’individu	Dynamique stochastique
Vitesse interne	Vitesse maximale désirée par le conducteur	Statique stochastique
Coefficients des routes (avancement et direction)	Champ de vision du conducteur au niveau de chaque intersection	Dynamique stochastique
Trajectoire	Itinéraire à suivre à partir du point origine pour atteindre la destination	Statique déterministe (court chemin) Dynamique stochastique (pas-à-pas et hybride)

TABLE 2.8 – Paramètres du modèle de mobilité V-MBMM.

Le tableau 2.8 présente une synthèse de l’ensemble des paramètres utilisés dans le modèle en distinguant les paramètres propres à chaque mobile de ceux de l’environnement.

Pour chaque paramètre sont indiqués : le nom, les données modélisées par le paramètre et le type du paramètre. Les paramètres statiques ont des valeurs invariables dans le temps, elles peuvent être déterministes ou calculées de manière aléatoire. Les paramètres dynamiques varient dans le temps, soit d'une période à l'autre (exemple attractivité des mailles), soit à chaque déplacement des véhicules (exemple coefficients de liberté). Les valeurs associées sont soit déterministes soit calculées à partir de données aléatoires.

2.3 Cas d'étude du modèle V-MBMM

Dans la section précédente nous avons présenté le modèle V-MBMM comme un modèle générique qui peut s'appliquer à tout environnement urbain ou suburbain. Les informations utilisées pour définir le schéma de mobilité peuvent être aléatoires, définies par l'utilisateur ou extraites à partir de données réelles relatives au territoire considéré.

Pour l'implémentation du modèle, sa validation et la visualisation des traces de mobilité, nous avons réutilisé le code de l'application TM (*Territoire Mobile*). Cette application ayant été spécifiquement conçue pour la description du territoire de Belfort, plusieurs modifications et extensions ont été apportées au code afin de pouvoir simuler un environnement quelconque (l'environnement devient une instance). Les extensions concernent principalement la simulation, la configuration et la visualisation de la mobilité des véhicules dans un environnement quelconque. Pour rester dans la thématique de notre travail, nous avons renommé l'application VN pour *Vehicular Network*.

Trois cas d'étude ont été considérés pour valider le modèle : environnement simple (Manhattan et Voronoï), la communauté d'agglomération Belfortaine (CAB) et la communauté d'agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines (CASQY). Les mécanismes sont communs à tous les environnements : détermination Origine-Destination, calcul de la trajectoire, régulation de la vitesse, changement de voie. La différence réside dans la définition de la topologie des routes et des données fournies sur l'environnement et utilisées dans le modèle : données théoriques, données issues de traces et données issues d'enquêtes.

2.3.1 Mobilité théorique en environnement simple

Pour la compréhension de certains phénomènes du réseau, il est parfois nécessaire de considérer des environnements peu ou pas complexes dont on maîtrise les caractéristiques. En effet, lorsque plusieurs paramètres entrent en jeu dans l'analyse et l'étude d'un phénomène, il est difficile et parfois impossible d'interpréter les résultats. Deux types d'environnements simples peuvent être simulés avec l'application VN : la grille Manhattan et le diagramme de Voronoï. La grille Manhattan (figure 2.7.a) est composée d'un ensemble

de routes horizontales et verticales. Pour les deux environnements, les valeurs par défaut des attributs de chaque route sont :

- Double voies : toutes les routes ont deux voies, une dans chaque direction.
- Vitesse limite : deux vitesses limites sont définies, elles permettent de distinguer deux types de routes, les routes à grande vitesse et les routes secondaires.
- Poids d'attraction : statiques et identiques pour toutes les routes. Les points origine-destination sont donc déterminés de manière aléatoire.
- Profil de mobilité : les structures de l'environnement n'étant pas renseignées, les profils de mobilité ne sont pas pris en compte.

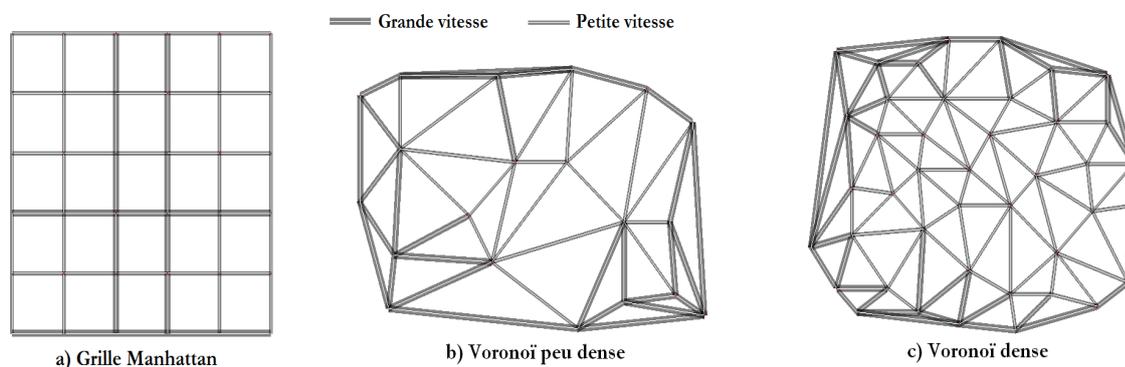


FIGURE 2.7 – Topologies de routes simples.

Les graphes de routes obtenus avec le diagramme de Voronoï sont représentés sur les figures 2.7.b et 2.7.c. Les routes peuvent être denses, figure (2.7.c), et avoir plusieurs intersections, ou peu denses, figure (2.7.b), avec moins d'intersections. Les attributs de chaque route ont les mêmes valeurs que dans la grille Manhattan à l'exception de la vitesse qui est déterminée de manière différente. L'environnement est divisé en deux zones, une zone interne, le centre ville, qui représente les milieux urbains, et une zone externe, la périphérie, qui représente les milieux suburbains. La vitesse limite affectée aux routes de la zone urbaine est inférieure à la vitesse limite des routes de la zone suburbaine. Ceci correspond au cas de la plupart des villes réelles. Les profils de mobilité sont également ignorés et les points origine destination sont déterminés de manière aléatoire.

2.3.2 Mobilité basée sur les traces : cas de la CAB

Le premier environnement de simulation, représentant une ville réelle, sur lequel nous avons appliqué le modèle de mobilité est la communauté d'agglomération Belfortaine (CAB) qui s'étend sur une superficie de $174,10 \text{ km}^2$. La population de la CAB a été estimée à 94 982 habitants en 2007 répartis sur les 30 communes de l'agglomération dont plus de 50% résidant dans la commune de Belfort. Les données utilisées pour la définition

de la topologie des routes et des caractéristiques associées proviennent du projet TM. Le graphe de routes est déduit à partir de fichiers de forme (Shapefile). Les fichiers fournis ne renseignent pas sur les caractéristiques des routes, les seules informations que nous avons sont les coordonnées des tronçons de routes à partir desquelles nous avons construit le graphe des routes comme le montre la figure 2.8. Les valeurs affectées aux attributs de chaque segment de route sont donc les valeurs par défaut spécifiées dans le tableau 2.4.



FIGURE 2.8 – Topologie des routes du centre ville de Belfort.

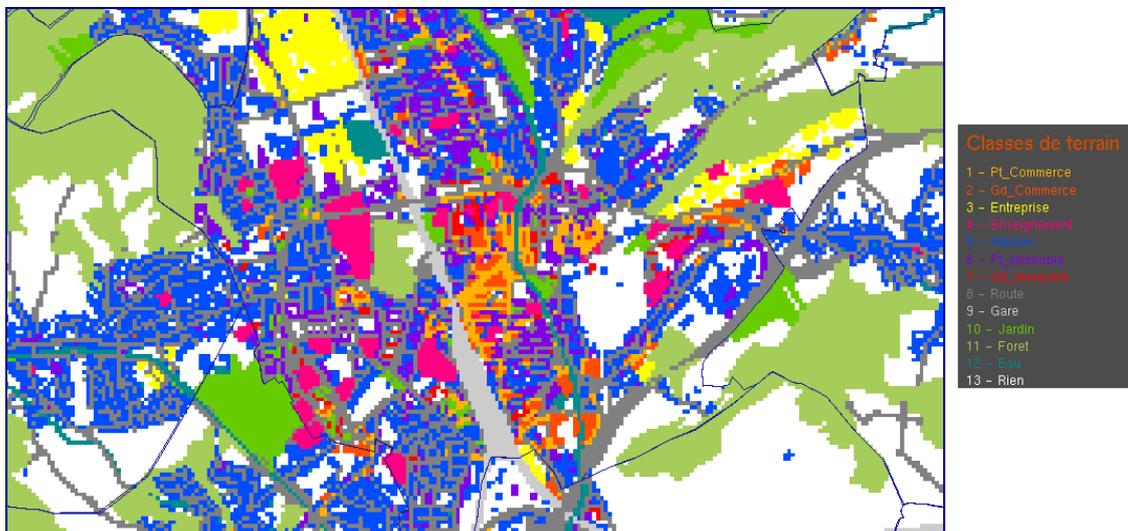


FIGURE 2.9 – Classification du terrain du centre ville de Belfort.

Le territoire est représenté par une grille de mailles de taille identique de $25\text{m} \times 25\text{m}$. Chaque maille est caractérisée par : (i) Une classe de terrain, l'une des 13 classes représentées sur la figure 2.9 et qui correspondent aux principaux types de structures présents dans le territoire ; (ii) Un vecteur de poids contenant 72 valeurs chacune représentant le pouvoir attractif de la maille durant un quart d'heure donné de la journée, entre 6h00 et 23h45.

Les figures 2.10 et 2.11 représentent l'attractivité des mailles au centre ville de Belfort respectivement à 14h00 et à 20h00.

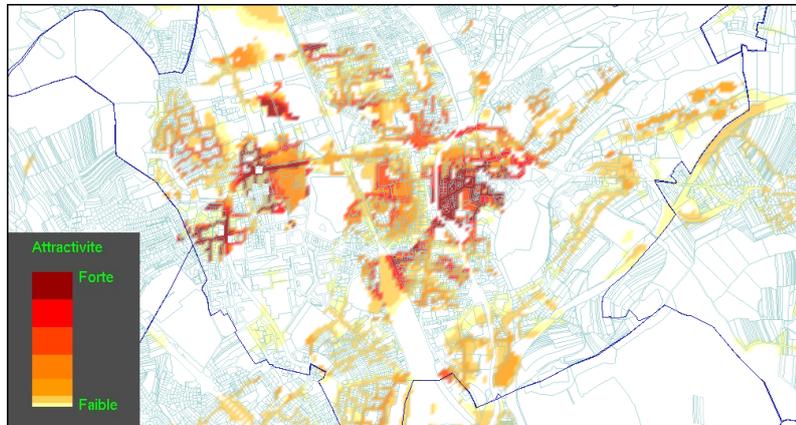


FIGURE 2.10 – Cartographie de l'attractivité du centre ville de Belfort à 14h00.

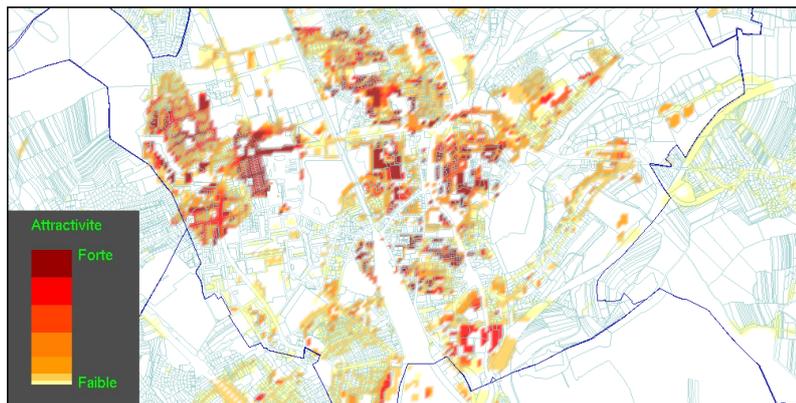


FIGURE 2.11 – Cartographie de l'attractivité du centre ville de Belfort à 20h00.

Les poids d'attraction sont calculés à partir de données sur la charge du réseau de téléphonie mobile, fournies par Orange dans le cadre du projet TM, et des caractéristiques géographiques et socioéconomiques du terrain, fournies par le SMTC et la CAB :

- L'attractivité des lieux : c'est une valeur définie pour chaque quart d'heure en fonction de l'activité que représente chacune des 13 classes du terrain. Elle permet de déterminer la distribution de la population sur le territoire à chaque quart d'heure de la journée. Le tableau 2.9 donne un exemple de l'attractivité de quelques structures sur la tranche horaire 7h30-8h29. La valeur 0 indique que la classe n'est pas attractive pendant le quart d'heure, elle n'attire personne, et 1 indique que la classe est attractive et attire donc des personnes sur les mailles correspondantes.
- La charge du réseau de téléphonie mobile : les valeurs sur l'attractivité des lieux sont complétées par des informations spécifiques sur l'utilisation de téléphones mo-

Structure	Attractivité			
	7h30	7h45	8h00	8h15
Commerce	0	0	0	0
Entreprise	0	0	1	1
Enseignement	0	1	1	1
Domicile	1	1	0	0
Route	1	1	1	1

TABLE 2.9 – Attractivité des structures en fonction des activités qu'elles représentent.

biles par les clients. Les données utilisées pour le calcul de la charge sont des traces réelles fournies par l'opérateur téléphonique Orange concernant la couverture radio de chaque antenne du réseau dont la cellule radio est présente sur la CAB et des données de trafic en nombre d'appels pour chacune de ces antennes. Les données de couverture radio sont des données maillées au pas de maille de 25m. Elles permettent d'identifier la couverture cellulaire des stations et de localiser les zones couvertes en les superposant aux données géographiques fournies par la CAB (parcelles, communes, bâtiments, routes...).

Les vecteurs d'attractivité des mailles sont calculés à partir de ces données. Le résultat est une matrice maille/vecteur de poids. Chaque ligne contient les valeurs d'attractivité, par quart d'heure, d'une maille donnée du territoire. En se basant sur cette matrice, nous avons calculé les valeurs d'attractivité des segments de route comme suit :

Pour chaque segment de route r :

1. Déterminer l'ensemble M_r des mailles $25m \times 25m$ qui composent le segment.
2. Pour chaque maille m de M_r déterminer l'ensemble MV_m de ses mailles voisines.
3. L'attractivité à la période T_i du segment r est la moyenne des attractivités, à T_i , des mailles de l'ensemble $M_r \cup \bigcup_{m \in M_r} MV_m$.

Pour valider les résultats concernant l'attractivité des routes, nous avons vérifié le degré de corrélation des valeurs d'attractivité des routes de chaque intersection. Le coefficient de corrélation a été calculé sur un sous ensemble d'intersections choisies de manière aléatoire. La moyenne des coefficients obtenue est de 0,72. Pour avoir une meilleure corrélation, qui signifie que le pouvoir attractif des routes connectées à chaque intersection varie de la même manière, nous avons défini un algorithme de lissage, Algorithme 1, qui, une fois appliqué sur la structure de la route, augmente la moyenne des coefficients de corrélation à 0,92.

Algorithme 1: Lissage de l'attractivité périodique des routes

Données :

 I , ensemble de toutes les intersections. R_i , ensemble des routes qui se rejoignent à l'intersection i . NR_i , nombre de routes de l'intersection i (cardinalité de R_i). N , nombre de période de la journée. $[A_r^1, A_r^2, \dots, A_r^N]$, vecteur d'attractivité de la route r .

Initialisation :

 $T := 0$ $M_{iter} = \text{constante}$ \ \ nombre maximum d'itérations $N_{iter} := 0$ **début**

```

tant que  $N_{iter} < M_{iter}$  faire
  pour chaque  $i \in I$  faire
    déterminer l'ensemble  $R_i$  et  $NR_i$ 
    déclarer une matrice  $M$  de  $NR_i$  lignes et  $N$  colonnes
    pour chaque  $r \in R_i$  faire
      tant que  $T < N$  faire
         $M[r, T] := \frac{\alpha A_r^T + \beta \sum_{k \neq r} A_k^T}{\alpha + \beta(NR_i - 1)}$ , tel que  $k \in R_i$ 
         $T := T + 1$ 
      fin
    fin
    pour chaque  $r \in R_i$  faire
      tant que  $T < N$  faire
         $A_r^T := M[r, T]$ 
      fin
    fin
     $N_{iter} := N_{iter} + 1$ 
  fin
fin

```

2.3.3 Mobilité basée sur les enquêtes : cas de la CASQY

Le second environnement réel sur lequel nous avons appliqué notre modèle est la communauté d'agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines (CASQY). La CASQY s'étend sur une superficie de $67,42 \text{ km}^2$ avec 145 513 habitants repartis sur ses 7 communes. Les données utilisées dans le modèle V-MBMM sont fournies par le projet LEDEME réalisé en

partenariat entre l'UTBM, la CASQY et Renault. Ce projet a pour objectif le développement d'un modèle de déplacement multimodal intégrant des véhicules électriques en libre service sur la CASQY. La base de données utilisée dans le projet LEDEME est construite à partir de plusieurs sources d'information dont les données d'une enquête ménage de déplacement effectuée auprès d'un échantillon représentatif de la population du territoire, environ 3000 personnes ; les enquêtes effectuées par les grandes entreprises auprès de certains employés concernant leur lieu de résidence, leur mode de transport, leur lieu de déjeuner, etc. ; le comptage du nombre de personnes partants et arrivants aux trois gares du territoire et les données INSEE issues du recensement de la population.

Il est à noter que notre travail ne fait pas partie du projet LEDEME, nous avons utilisé des fichiers de données traitées et des fichiers de formes que nous avons adaptés à notre modèle.

De même que pour le projet Territoire Mobile, le traitement des données réalisé dans le cadre du projet LEDEME consiste à représenter le territoire par une grille de mailles. A chaque maille sont associés une classe de terrain et un vecteur d'attractivité. Le pas de maillage retenu est $25\text{m} \times 25\text{m}$.

La classification et l'attractivité des mailles sont définies de la même manière que pour la CAB. Les classes de terrain sont déterminées à partir de données géographiques en fonction du type de structures présent sur chaque maille, comme le montre la figure 2.12.

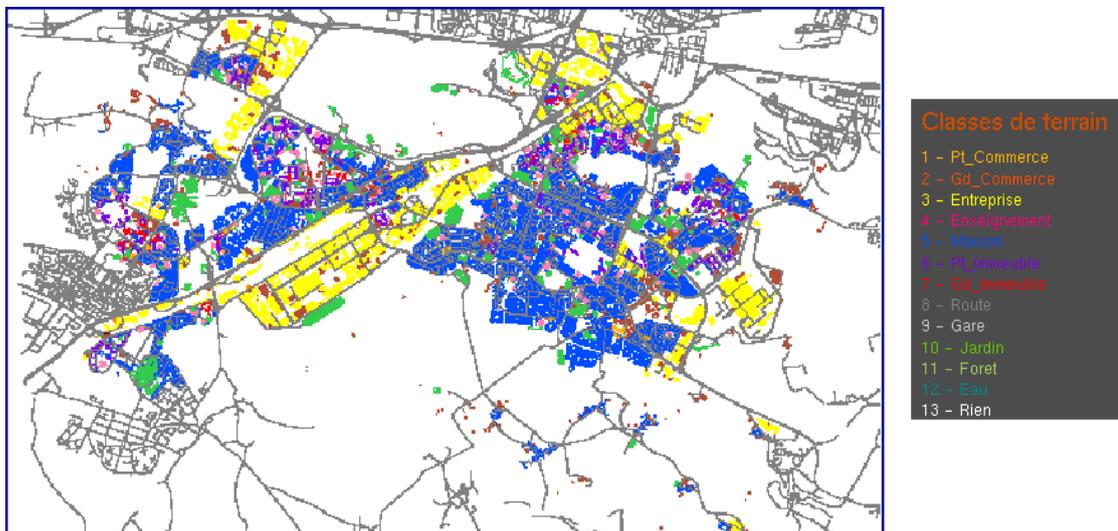


FIGURE 2.12 – Classification du terrain de la CASQY.

L'attractivité des mailles est définie par quart d'heure, 96 valeurs sont associées à chaque maille allant de 0h00 à 23h59. Les poids d'attractivité sont calculés à partir de :
 (i) l'attractivité par quart d'heure des lieux déterminée de la même manière que pour

la CAB en fonction de l'activité que représente chaque lieu ; (ii) la répartition par quart d'heure de la population dans le territoire déduite à partir des données issues des deux enquêtes ménage et entreprise, des données sur le trafic gare et du recensement réalisé par l'INSEE. Les données équivalentes dans le cas de la CAB sont celles de la charge du réseau de téléphonie mobile. Les figures 2.13 et 2.14 montrent l'évolution de l'attractivité de la CASQY respectivement à 8h00 et à 12h00.



FIGURE 2.13 – Cartographie de l'attractivité de la CASQY à 8h00.

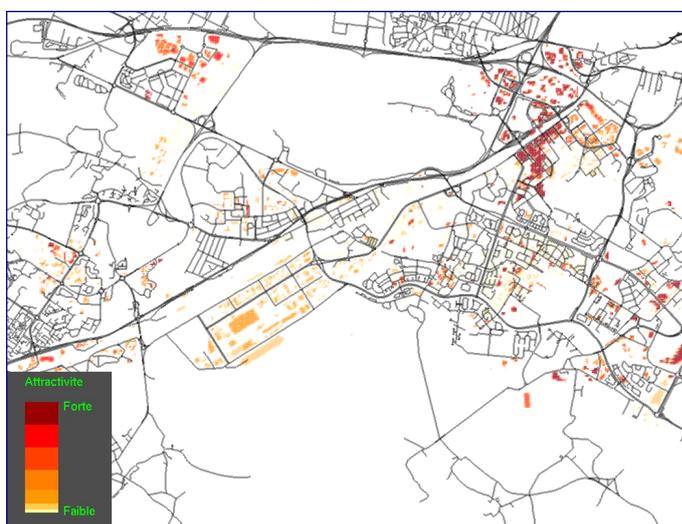


FIGURE 2.14 – Cartographie de l'attractivité de la CASQY à 12h00.

La figure 2.15 représente le graphe de routes de la CASQY construit à partir des fichiers de formes. Les données obtenues à partir des fichiers fournis sont, la liste de tronçons de route, le nombre et la direction des voies par tronçon et le niveau hiérarchique, représentant la vitesse limite, de chaque tronçon. Ces données ont été utilisées pour la définition du

graphe de route et des attributs de chaque route. Il est donc plus précis que celui de la CAB.

Les vecteurs d'attractivité des routes sont calculés de la même manière que pour la CAB (cf. section 2.3.2, page 75).

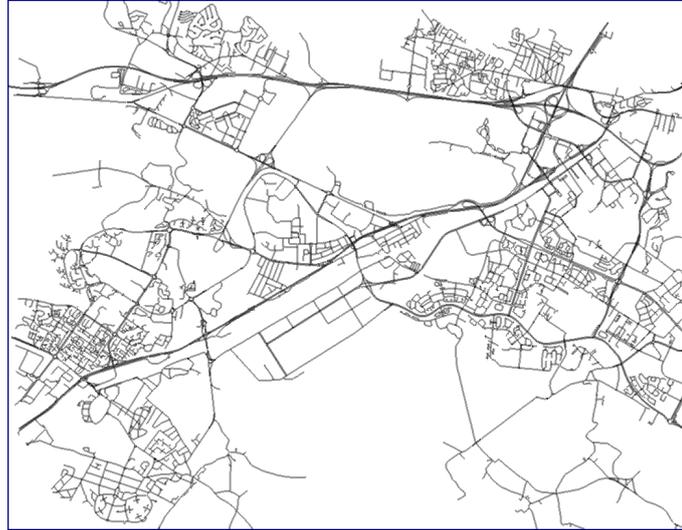


FIGURE 2.15 – Topologie de routes dans la CASQY.

2.4 Validation du modèle V-MBMM

Deux séries de tests ont été réalisées afin de valider le modèle proposé. Les premiers tests ont pour objectif de valider les mécanismes de base utilisés dans le modèle qui sont la régulation de la vitesse et le changement de voies. Dans cette série, nous avons analysé l'impact de la densité des véhicules et des caractéristiques de la route sur la vitesse moyenne. Pour faire varier les attributs des routes et bien analyser leur impact, nous avons considéré les environnements simples de type Manhattan et Voronoï. Les seconds tests ont pour objectif de démontrer que le modèle V-MBMM prend bien en compte l'influence de l'environnement sur le déplacement des véhicules et reproduit les activités journalières des individus. Les tests ont été réalisés en considérant les deux environnements réels, la CAB et la CASQY. Nous avons analysé la répartition de la population vis-à-vis de l'attractivité des lieux et les activités des individus sur les périodes de la journée.

2.4.1 Analyse des mécanismes de base

Plusieurs paramètres peuvent influencer la vitesse des véhicules sur les routes, le plus évident étant la densité du trafic. Plus le nombre de véhicules qui circulent sur la route

est important, plus le risque d'embouteillage est élevé, par conséquent la vitesse moyenne des véhicules décroît. La structure de la route est l'autre paramètre qui joue un rôle aussi important que la densité de trafic dans la détermination de la vitesse. A partir de l'analyse de l'ensemble des tests que nous avons effectué, nous avons identifié quatre caractéristiques dominantes qui influencent la vitesse moyenne : (i) *Densité des routes* : lorsque la quantité de routes dans un territoire est faible, les embouteillages deviennent plus importants ce qui cause une baisse de la vitesse ; (ii) *Nombre de voies* : les routes à voies multiples offrent une meilleure fluidité de trafic qui permet aux véhicules de circuler au plus proche des vitesses désirées ; (iii) *Nombre d'intersections* : plus les intersections sont fréquentes plus les véhicules sont obligés de ralentir pour s'arrêter aux feux rouges, cela réduit la vitesse moyenne ; (iv) *Nombre de routes aux intersections* : le temps d'attente des véhicules aux intersections est directement lié à la durée des feux rouges qui est proportionnelle au nombre de routes qui se rejoignent à l'intersection. Lorsque ce nombre est élevé, la durée des feux rouges, et par conséquent le temps d'attente des véhicules, augmente et cause une diminution de la vitesse moyenne.

Le tableau 2.10 résume les valeurs des paramètres de simulation des premiers tests réalisés. Nous avons analysé la variation de la vitesse moyenne en fonction de quatre paramètres : densité des véhicules, nombre de voies par route, durée des feux rouges et vitesses minimales et maximales des véhicules.

Paramètre	Valeur
Taille de la la zone	5km × 5km
Environnement	Manh200 : Grille Manhattan avec des blocs de 200m Manh400 : Grille Manhattan avec des blocs de 400m VoroDense : Diagramme de Voronoï dense VoroSparse : Diagramme de Voronoï peu dense
Population candidate pour la mobilité	2500, 5000, 75000, 10000, 12500, 15000, 17500, 20000, 25000, 30000
Durée des feux rouges	45s
V_{min}, V_{max}	30km/h, 50km/h
Vitesse limite des routes	80km/h
Nombre de voies	Double avec une voie dans chaque sens
Attractivité et Activités	Non prises en compte, donc uniformes

TABLE 2.10 – Valeurs des paramètres de simulation - validation mécanismes V-MBMM.

a) Densité des véhicules

Le graphe 2.16 montre la variation de la vitesse en fonction de la densité des véhicules. Dans tous les environnements considérés, les routes sont à double sens avec une voie dans chaque sens. Les résultats montrent qu'à très faible densité, population de 2500 véhicules,

les plus grandes vitesses sont enregistrées dans Manh400 et VoroSparse et les plus faibles dans Manh200 et VoroDense. Avec l'augmentation du trafic, les résultats s'inversent. Les vitesses dans Manh200 sont supérieures à celles de Manh400 et celles de VoroDense sont supérieures à celles de VoroSparse. Ceci est dû au fait qu'à forte densité de véhicules, les conducteurs ralentissent principalement à cause des embouteillages alors qu'à faible densité de trafic, les véhicules ralentissent essentiellement à l'approche des feux rouges. La probabilité qu'un véhicule rencontre un véhicule lent étant très faible. Le tableau 2.11 donne les caractéristiques des routes dans les quatre environnements déduites à partir des paramètres de simulation.²

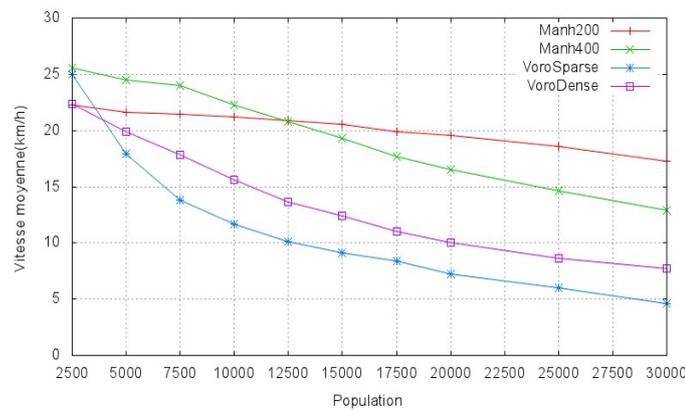


FIGURE 2.16 – Vitesse moyenne vs. Nombre de véhicules (routes à deux voies).

Environnement	Longueur totale de route (km)	Nombre d'intersections	Longueur moyenne des routes entre intersections (km)	Moyenne de routes par intersection
Manh200	227,7	529	0,225	3,82
Manh400	112,8	144	0,425	3,66
VoroDense	148,74	60	0,885	5,6
VoroSparse	88,3	18	1,919	5,11

TABLE 2.11 – Caractéristiques des routes des environnements simulés.

VoroSparse est l'environnement qui possède le plus petit nombre d'intersections ce qui explique la vitesse moyenne élevée enregistrée avec 2500 véhicules. La vitesse dans Manh200 est plus faible à cause du nombre élevé d'intersections qui oblige les véhicules à ralentir et s'arrêter plus souvent. Bien que le nombre d'intersections dans VoroDense soit inférieur que dans Manh200 et Manh400, la vitesse moyenne enregistrée dans VoroDense,

² Le nombre moyen de routes par intersection est égal au nombre de segments de route fois deux le tout divisé par le nombre d'intersections.

avec une densité de 2500, est plus faible. La raison étant que le nombre moyen de routes par intersection dans VoroDense est supérieur que dans Manh200 et Manh400, la durée d'attente des véhicules aux feux rouges est par conséquent plus élevée ce qui fait baisser la vitesse moyenne. Lorsque la densité du trafic augmente, la principale cause de décélération est la rencontre d'un véhicule lent et les embouteillages. VoroSparse étant l'environnement qui possède le moins de routes, 88,3km contre 227,7km dans Manh200, il présente les plus faibles valeurs de vitesse moyenne. Les valeurs dans VoroDense sont plus faibles que dans Manh200 et Manh400 à cause d'une part, de la faible densité des routes et d'autre part, du nombre élevé de routes aux intersections.

b) Nombre de voies

Dans le but de montrer l'impact des voies multiples, nous avons réalisé les mêmes tests en considérant des routes doubles à trois voies dans chaque sens. La figure 2.17 montre les résultats obtenus. En comparant les résultats de la figure 2.16 à ceux de la figure 2.17 nous pouvons constater que la vitesse est globalement plus élevée notamment à forte densité de trafic. Avec des routes à six voies, les embouteillages deviennent moins importants puisqu'au niveau de chaque intersection les véhicules se répartissent sur les trois voies de la route, chacun favorisant la voie qui lui permet d'accélérer ou au pire de garder la même vitesse. Nous pouvons cependant observer que l'augmentation de la vitesse dans VoroSparse est faible comparée aux autres environnements. Malgré le fait que les routes soient à voies multiples, les embouteillages dans VoroSparse restent importants à cause de la faible densité de routes.

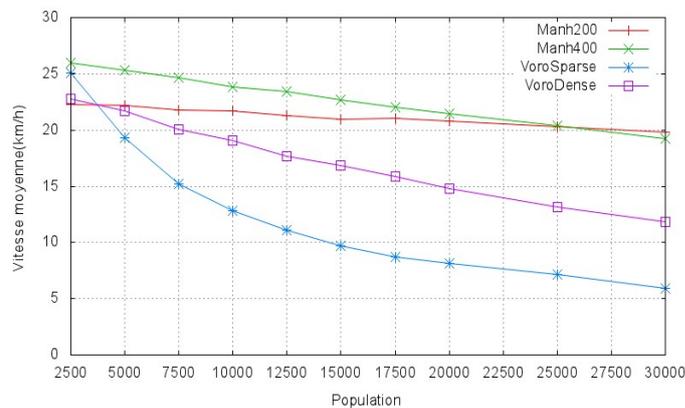


FIGURE 2.17 – Vitesse moyenne vs. Nombre de véhicules (routes à six voies).

c) Durée des feux rouges

Afin de montrer à la fois la prise en compte des caractéristiques de la route par V-MBMM et d'étudier l'impact de ces caractéristiques sur la mobilité des véhicules, nous avons conduit d'autres tests pour analyser l'effet de la durée des feux sur la vitesse moyenne.

Le tableau 2.12 résume les valeurs des paramètres, les zones considérées sont deux fois plus grandes qu'auparavant.

Paramètre	Valeur
Taille de la la zone	10km × 10km
Environnement	Manh200 : Grille Manhattan avec des blocs de 200m Manh400 : Grille Manhattan avec des blocs de 400m Manh800 : Grille Manhattan avec des blocs de 800m
Population candidate pour la mobilité	10000, 20000
Durée des feux rouges	0, 45, 90, 135, 180 secondes
V_{min}, V_{max}	30mk/h, 50km/h
Vitesse limite des routes	80km/h
Nombre de voies	Double avec une voie dans chaque sens

TABLE 2.12 – Valeurs des paramètres de simulation - tests 2.

La figure 2.18 représente la variation de la vitesse moyenne en fonction de la durée des feux observée dans les six cas de configuration, Manh200, Manh400 et Manh800 avec une population de 10000 et 20000 véhicules candidats à la mobilité.

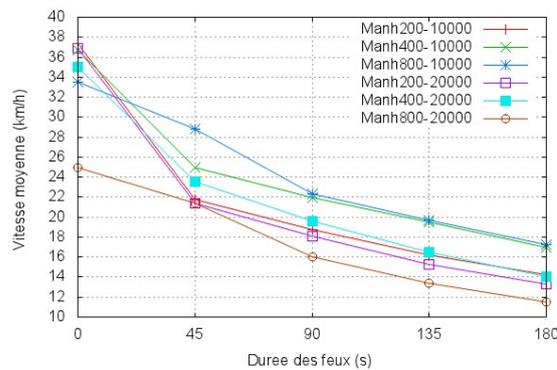


FIGURE 2.18 – Vitesse moyenne vs. Durée des feux.

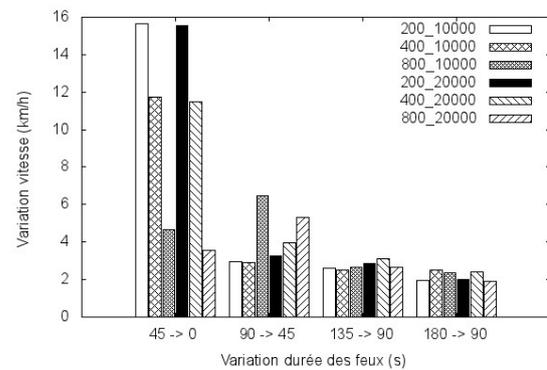


FIGURE 2.19 – Variation vitesse moyenne vs. Variation de la durée des feux.

Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la durée des feux rouges, la vitesse moyenne diminue dans toutes les configurations en raison du temps d'attente plus élevé des véhicules aux intersections. Les valeurs obtenues diffèrent d'un environnement à l'autre à cause de la différence dans les caractéristiques des routes. La vitesse moyenne dans chaque environnement dépend de la densité des routes, du nombre total d'intersections et de la distance entre intersections. Manh200 possède le plus grand nombre d'intersections et la plus faible longueur de routes entre intersections, les véhicules décèlent principalement

à l'approche des feux rouges. Contrairement à Manh200, Manh800 possède moins d'intersections, une plus longue distance entre intersections mais une faible densité de routes, par conséquent, les véhicules ralentissent le plus souvent à cause des embouteillages. Manh400 est intermédiaire entre Manh200 et Manh800, les valeurs de tous les paramètres sont comprises entre celles de ces deux environnements.

La figure 2.18 montre qu'à forte densité de trafic, et pour toutes les durées des feux, la vitesse est plus faible dans Manh800 à cause des embouteillages. Le même résultat est observé avec une densité de 10000 véhicules et les feux désactivés (durée égale à 0s). La vitesse moyenne dépasse les 37km/h dans Manh200 et Manh400 et est seulement de 33,8km/h dans Manh800.

A faible densité de trafic, 10000 véhicules, et pour une durée de feux égale à 45s, il n'y a pas d'embouteillage et le trafic est fluide, les véhicules ralentissent essentiellement à l'approche des feux rouges. La vitesse moyenne observée est par conséquent dépendante du nombre d'intersections dans l'environnement et de la longueur de routes entre intersections. Elle est plus élevée dans Manh800, suivi de Manh400 puis Manh200. Ceci est démontré dans la figure 2.19 qui présente la variation de la vitesse en fonction de la variation de la durée des feux. Les résultats montrent que lorsque la durée des feux passe de 0s à 45s, quelle que soit la densité, la vitesse baisse de plus de 15km/h dans Manh200, de plus de 11,5km/h dans Manh400 et de moins de 5km/h dans Manh800. Ce raisonnement explique également pourquoi la vitesse est supérieure dans Manh400 comparé à Manh200 pour une densité de 20000 véhicules et toutes les durées des feux rouges.

Avec des durées de feux supérieures ou égales à 90s et une densité de 10000 véhicules, nous pouvons observer sur la figure 2.18 que les vitesses enregistrées dans Manh800 ne sont plus supérieures à celles de Manh400. En s'arrêtant plus longtemps aux intersections, la durée des trajets des véhicules est plus longue, les véhicules circulent plus longtemps sur les routes³ ce qui accroît les embouteillages. L'effet de ces derniers étant plus important dans Manh800. La figure 2.19 montre qu'en effet, lorsque la durée des feux passe de 45s à 90s la vitesse diminue de 3km/h dans Manh400 et 6km/h dans Manh800.

d) Vitesses minimales et maximales des véhicules

Le dernier critère analysé est la variation de la vitesse moyenne issue de la simulation en fonction des vitesses maximales et minimales ($[v_{min}, v_{max}]$) des véhicules fournies en paramètres d'entrée. Les vitesses minimales et maximales correspondent aux bornes de la vitesse interne reflétant les habitudes des conducteurs, selon qu'ils roulent vite ou pas. Les résultats sont présentés dans les figures 2.20 et 2.21. Les valeurs des autres paramètres sont

3. Dans les simulations, chaque véhicule qui finit son parcours est supprimé de la route.

celles du tableau 2.12 et la durée des feux est fixée à 45s.

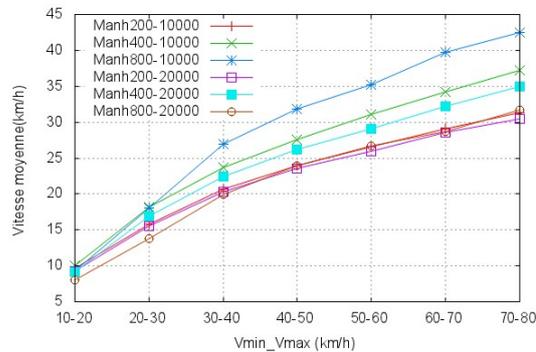


FIGURE 2.20 – Vitesse moyenne vs. Vitesses minimales et maximales des véhicules.

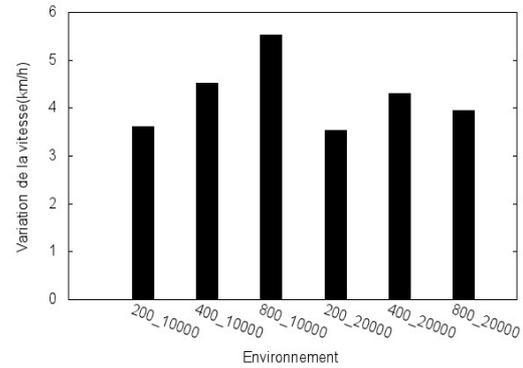


FIGURE 2.21 – Variation vitesse moyenne vs. variation vitesses minimales et maximales des véhicules.

La figure 2.20 montre que la vitesse augmente avec l'augmentation des valeurs de l'intervalle $[v_{min}, v_{max}]$. Avec une densité de 10000 véhicules, la vitesse est plus élevée dans Manh800 suivi de Manh400 puis Manh200. Ceci est due d'une part au nombre d'intersections qui est plus faible dans Manh800 comparé à Manh400 et, dans Manh400 comparé à Manh200, et d'autre part à la distance qui sépare les intersections qui est plus élevée dans Manh800, puis dans Manh400 et enfin dans Manh200. Lorsque la distance entre intersections est plus grande, les véhicules ont plus de possibilité d'accélérer et d'atteindre leur vitesse maximale avant d'arriver à la prochaine intersection et de décélérer. Ceci peut être observé sur la figure 2.21 qui montre la variation de la vitesse moyenne pour tous les scénarios, calculée comme suit :

$$\Delta V = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \Delta v(i, i+1)$$

où $\Delta v(i, i+1)$ la différence entre la vitesse moyenne obtenue avec $v_{min} = 10i$ et $v_{max} = 10(i+1)$ et celle obtenue avec $v_{min} = 10(i+1)$ et $v_{max} = 10(i+2)$, pour tout $i = 1, 2, \dots, 6$.

En effet, la figure montre qu'avec une densité de 10000 mobiles, la vitesse moyenne croît plus rapidement dans Manh800 suivi de Manh400 puis de Manh200.

Pour une densité de 20000 véhicules, la figure 2.20 montre que les vitesses les plus élevées sont enregistrées dans Manh400. En raison des embouteillages, dus au faible nombre de routes, l'augmentation de la vitesse est moins rapide dans Manh800 comme illustré par la figure 2.21.

Les résultats obtenus à l'issue de ces premiers tests permettent de valider les mécanismes de base utilisés dans V-MBMM. L'attractivité des lieux et les activités des individus ne sont pas prises en compte dans ces tests étant donné qu'elles n'ont pas d'influence directe

sur les mécanismes étudiés. L'analyse de ces deux paramètres constitue l'objectif de la série de tests que nous développons dans ce qui suit.

2.4.2 Analyse de la répartition de la population vs. l'attractivité des lieux

Selon l'approche utilisée dans le modèle, la répartition de la population doit obéir à l'attractivité des lieux et les activités des individus doivent correspondre à ce que l'on peut observer dans la vie quotidienne.

Afin de vérifier ces deux critères, nous avons réalisé les derniers tests sur les environnements réels intégrés à l'application VN. Nous avons considéré l'ensemble des périodes de la journée définies dans le modèle et présenté les résultats obtenus sur les périodes représentatives des activités journalières des individus : départ au travail le matin, pause déjeuner à midi, sortie du travail en fin d'après midi et loisirs le soir. Nous avons analysé les résultats obtenus avec les deux environnements et choisi de présenter dans cette thèse les résultats obtenus avec la CAB pour l'étude de l'attractivité et ceux obtenus avec la CASQY pour l'analyse des activités journalières des individus.

Le premier critère étudié est la répartition de la population à l'issue de la simulation vis-à-vis de l'attractivité des lieux fournie en données d'entrée. Les véhicules doivent être plus attirés par les structures attractives de l'environnement. Les tests ont été réalisés sur une population de 10 000 véhicules se déplaçant dans le territoire de Belfort sur quatre tranches horaires : 07h00-09h00, 12h00-14h00, 17h00-19h00 et 19h00-21h00. Deux critères ont été estimés et analysés : le degré d'attractivité des routes empruntées par les véhicules et la répartition de la population par zone.

	CC	PAP	HYP
Taux d'arrivée à destination	0,94	0,51	0,83
$D_{parcourue}/D_{Euclidienne}$ entre origine-destination	1,62	3,80	2,46
Attractivité des routes empruntées	1,38	2,19	1,69

TABLE 2.13 – Caractéristiques des trajectoires obtenues avec les algorithmes CC, PAP et HYB.

Le tableau 2.13 montre les résultats, concernant les routes empruntées par les véhicules, obtenus avec les trois stratégies de calcul de trajectoire, plus court chemin (CC) calculé en fonction de la distance euclidienne, pas-à-pas (PAP) et hybride, soit pas-à-pas appliqué à partir du plus court chemin (HYB). Les valeurs sont des moyennes calculées sur les quatre tranches horaires citées précédemment. Par ce tableau, nous voulons également mettre en

évidence la différence qui existe entre les trois stratégies de calcul de trajectoire. La deuxième ligne du tableau représente le taux de véhicules, sur l'ensemble de la population, qui arrive à destination avant la fin de la période considérée. Les véhicules ayant démarré à moins de 10mn de la fin de la durée de la simulation sont ignorés pour éviter le biais des véhicules non arrivés du fait d'un manque de temps. D'après le tableau 2.13, plus de 94% de véhicules arrivent à destination avec l'algorithme CC. Etant donné que le critère de calcul de la trajectoire est la distance, les véhicules parcourent moins de routes pour arriver à destination. Le rapport entre la distance parcourue par les véhicules et la distance euclidienne qui sépare le point origine du point destination est de 1,62. Ce rapport augmente à 3,80 avec l'approche PAP, ce qui fait que seulement 51% des véhicules arrivent à destination. Cependant l'algorithme PAP prend mieux en compte l'attractivité des routes comparé à CC. La quatrième ligne du tableau 2.13 représente le rapport entre l'attractivité moyenne des routes traversées par les véhicules et l'attractivité moyenne de toutes les routes du territoire. Les routes traversées par les véhicules dans le cas PAP ont une attractivité 2,19 fois supérieure à la moyenne contre 1,38 dans le cas CC. L'algorithme hybride joue le rôle d'un compromis entre les deux méthodes, en utilisant l'approche CC il permet un meilleur taux d'arrivée comparé à PAP, 83% contre 51%, et en intégrant l'aspect PAP, il prend mieux en compte l'attractivité des routes comparé à CC, 1,69 contre 1,38.

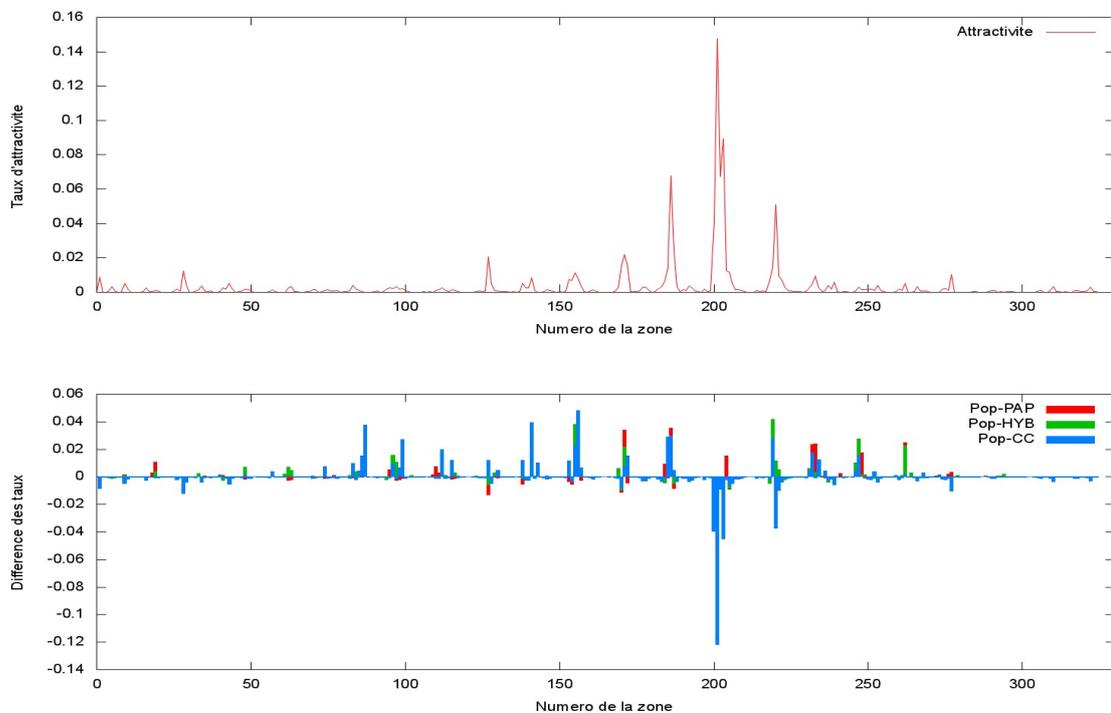


FIGURE 2.22 – Répartition de la population sur les zones du territoire.

Pour analyser la répartition de la population dans le territoire, nous avons estimé le taux de présence des véhicules par zone. Nous avons divisé la carte du territoire en zones de taille $800\text{m}\times 800\text{m}$ et calculé le nombre de véhicules se trouvant sur chaque zone à intervalle de 3mn. Les tests ont été réalisés sur les quatre tranches horaires, 07h00-09h00, 12h00-14h00, 17h00-19h00 et 19h00-21h00, en utilisant chacun des algorithmes CC, PAP, et HYB. La première courbe de la figure 2.22 représente le taux d'attractivité des zones ⁴

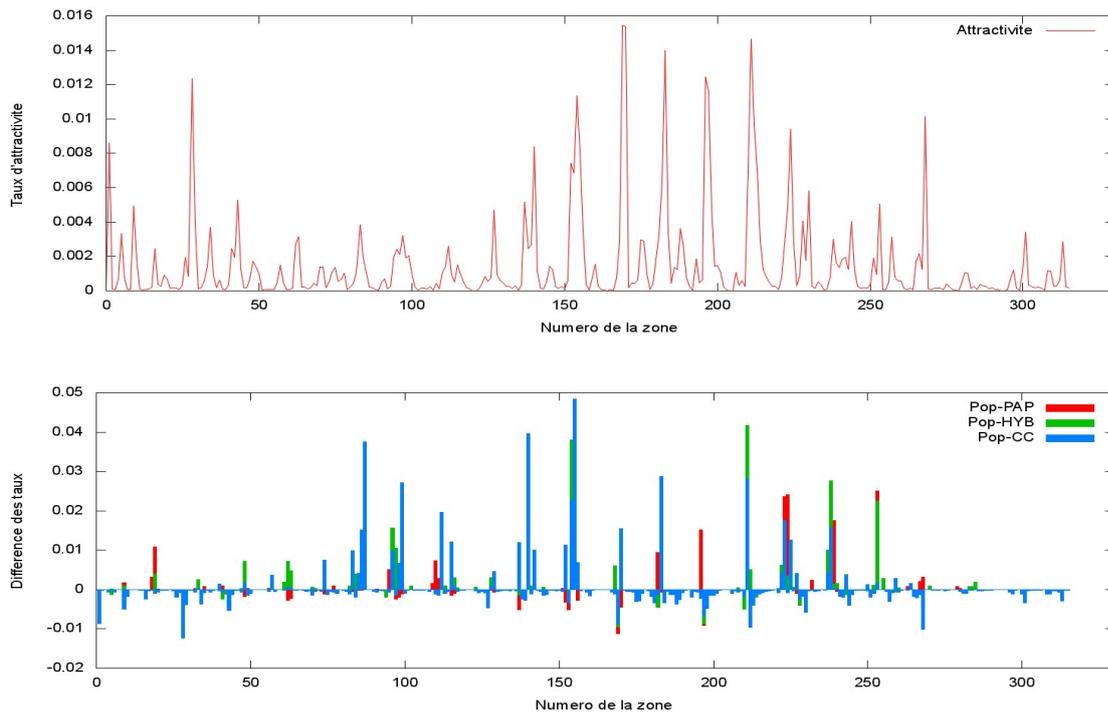


FIGURE 2.23 – Répartition de la population sur les zones à moyenne et à faible attractivité du territoire.

du territoire calculée à un instant t , choisi aléatoirement. La deuxième courbe de la figure représente la différence, pour chaque zone, entre le taux d'attractivité de la zone et le taux de véhicules présents dans la zone (à l'instant t). Plus la différence, en valeur absolue, est grande, plus la prise en compte de l'attractivité est faible et donc la simulation erronée. On peut observer que les valeurs les plus élevées sont obtenues avec l'approche CC, suivie de HYB puis PAP. La même observation peut être faite sur la figure 2.23 qui représente les mêmes résultats en considérant uniquement les zones à moyenne et faible attractivité.

Les tableaux 2.14 et 2.15 montrent la moyenne et l'écart type des différences entre les taux d'attractivité des zones et les taux de présence des véhicules par zone. Les calculs sont faits à partir des valeurs absolues. La moyenne des différences donne une information

4. L'attractivité d'une zone à un instant t est égale à la moyenne des attractivités, à t , des mailles $25\text{m}\times 25\text{m}$ de la zone.

Différence des taux	CC	PAP	HYB
Moyenne	0,006	0,002	0,003
Ecart type	0,057	0,005	0,008

TABLE 2.14 – Différence des taux entre attractivité et présence des véhicules dans tout le territoire.

Différence des taux	CC	PAP	HYB
Moyenne	0,004	0,001	0,002
Ecart type	0,040	0,003	0,004

TABLE 2.15 – Différence des taux entre attractivité et présence des véhicules dans les zones à moyenne et faible attractivité.

générale, c'est-à-dire dans tout le territoire, sur la répartition de la population par rapport à l'attractivité. Les valeurs des deux tableaux indiquent que quelle que soit la stratégie utilisée, l'attractivité des routes est globalement respectée. Comme les points origine et destination de chaque véhicule sont déterminés en fonction de l'attractivité des lieux, le trafic est plus important dans les zones attractives. Dans les algorithmes PAP et HYB l'attractivité est également prise en compte dans la détermination de la trajectoire, ce qui donne un meilleur rapport entre l'attractivité des lieux et la répartition de la population.

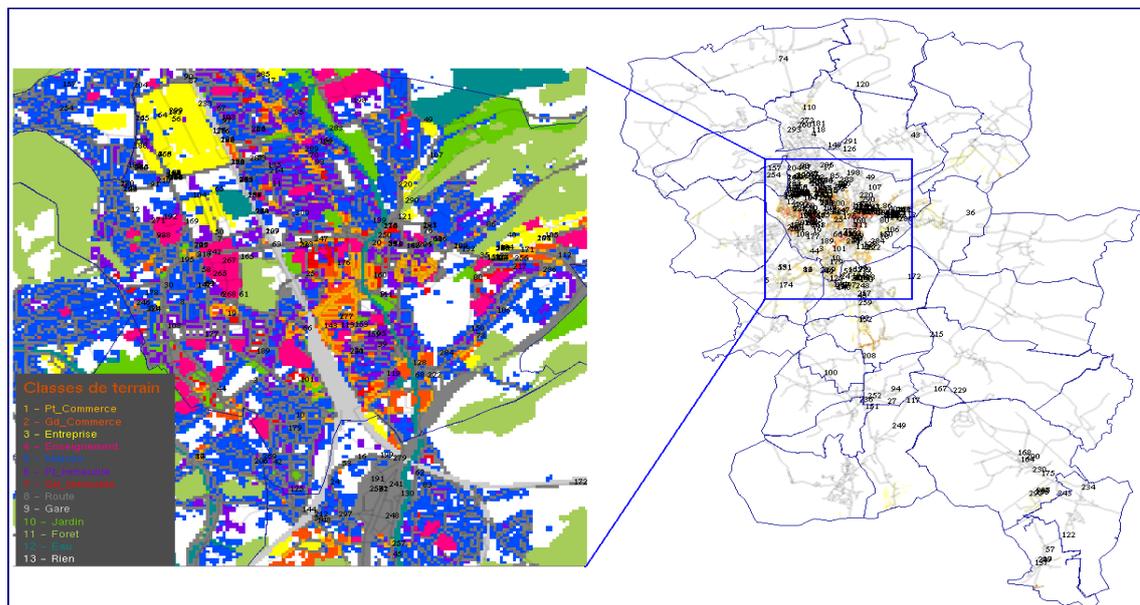


FIGURE 2.24 – Répartition de la population dans la CAB.

Toujours dans l'objectif de montrer que l'impact de l'attractivité est pris en compte dans le modèle V-MBMM, la figure 2.24 montre la répartition de la population (400 mobiles)

sur le territoire de Belfort à 12h05, à la sortie du travail. La partie droite de la figure montre que les véhicules sont concentrés dans la zone la plus attractive du territoire qui est le centre ville de Belfort. La partie gauche est un agrandissement du centre ville de Belfort qui montre la répartition de la population dans les structures. On peut observer une forte présence des véhicules à proximité des entreprises (en jaune) et des établissements d'enseignement (en rouge).

2.4.3 Analyse des activités journalières

Rappelons que dans V-MBMM les activités des individus sont définies en divisant la journée en périodes et en associant à chacune, un taux de mobilité, une loi de distribution de la mobilité sur la période et une liste d'activités avec le taux de mobilité par activité.

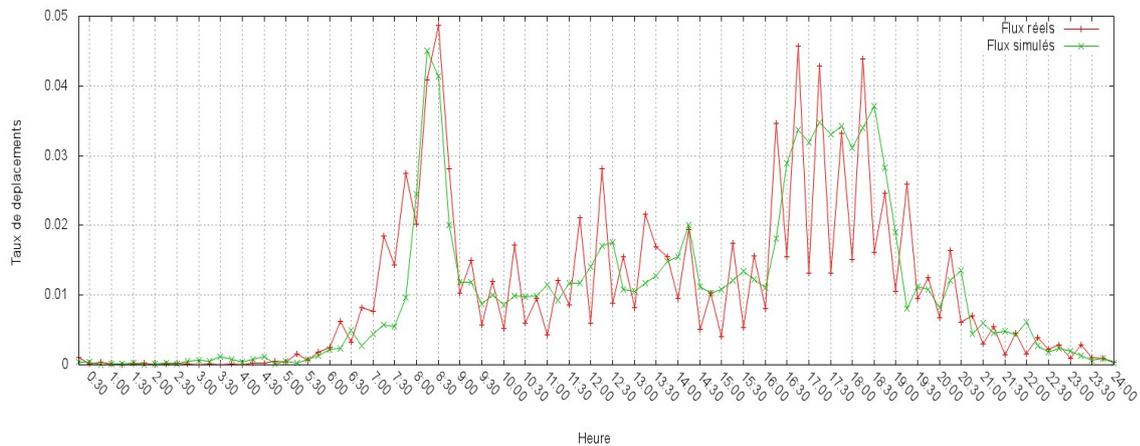


FIGURE 2.25 – Flux de déplacements réels vs. Flux de déplacements simulés.

Le premier critère que nous avons analysé est la mobilité par période indépendamment des activités. La figure 2.25 compare les taux de mobilité par quart d'heure obtenus par simulation aux taux réels. Les données réelles sont issues des enquêtes ménage et entreprises menées dans la CASQY sur le déplacement des individus. Les données de simulation sont obtenues sur des tests avec une population de 2000 véhicules. Les résultats montrent que les deux courbes ont quasiment la même allure. On peut distinguer 4 périodes de mobilité : *(i)* mobilité quasi nulle de 0h00 à 7h00 et de 22h00 à 24h00, qui correspond à la nuit ; *(ii)* forte mobilité de 7h00 à 9h00 et de 16h00 à 19h30, représentant principalement les périodes de départ au travail et de retour au domicile, cette mobilité atteint son maximum entre 8h15 et 8h45 pour la première période et entre 16h45 et 18h30 pour la seconde période, à la suite desquelles elle décroît, *(iii)* mobilité moyenne et constante de 9h00 à 11h45 et de 14h15 à 16h00, *(iv)* mobilité forte à moyenne entre 11h45 et 14h15, croissante de 11h45 à 12h30 et de 13h30 à 14h15, elle représente la pause déjeuner.

Dans le modèle V-MBMM, les taux de mobilité sont définis de manière pseudo aléatoire, la figure 2.26 montre un autre exemple comparant la répartition de la mobilité obtenue avec V-MBMM aux données réelles. On peut observer que les taux de mobilité obtenus par simulation ont la même tendance que ceux présentés sur la figure 2.25.

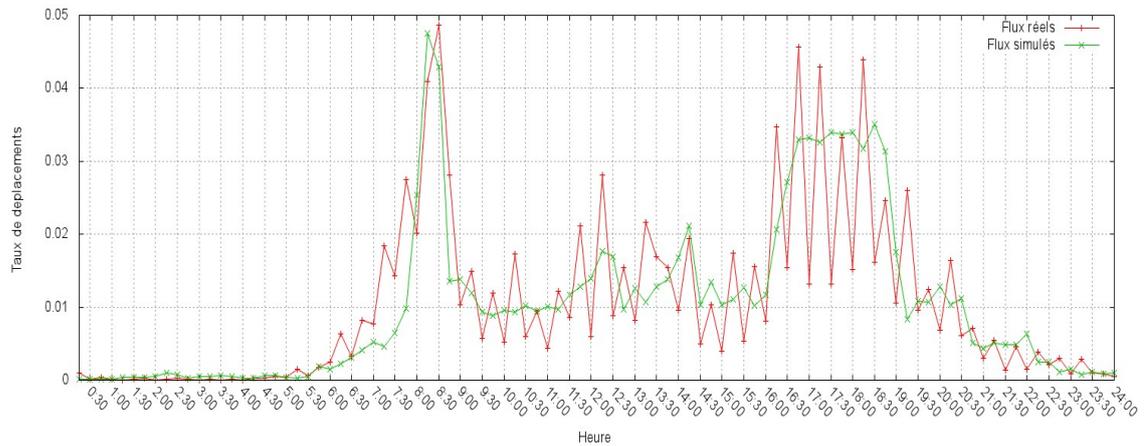


FIGURE 2.26 – Flux de déplacements réels vs. Flux de déplacements simulés.

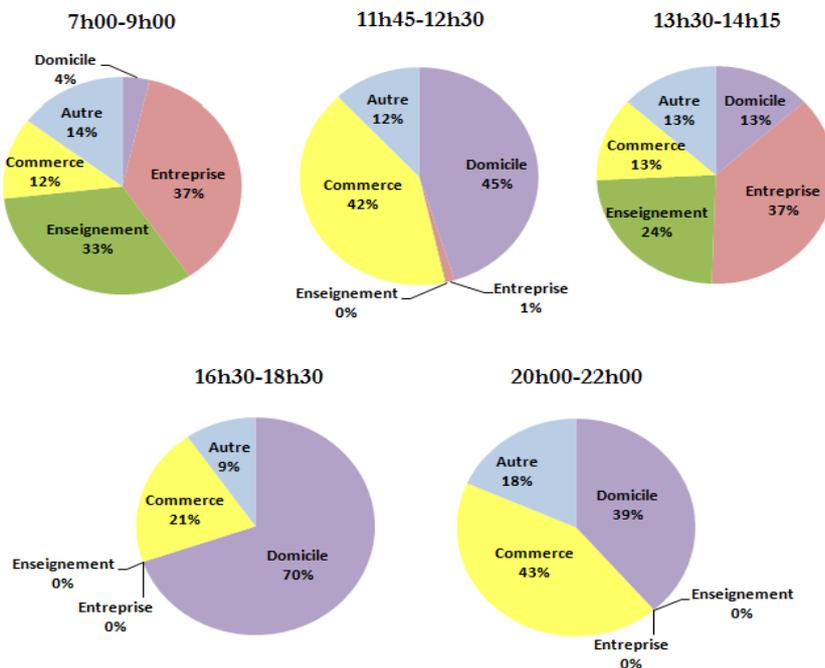


FIGURE 2.27 – Flux de déplacement entrants.

Dans le but d'analyser les activités, nous avons considéré les quatre types de structures de base et calculé les flux entrants et les flux sortants pour chacun. Les structures sont Entreprise, Enseignement, Commerce et Domicile. Ce dernier englobe, maison, petits

bâtiments et grands bâtiments. Les commerces incluent la restauration. Le type *Autre* correspond aux classes de terrain de type gare, jardin et forêt. Les calculs sont faits sur cinq périodes de la journée : départ au travail entre 7h00 et 9h00, départ en pause déjeuner de 11h45 à 12h30, retour au travail de 13h30 à 14h15, sortie du travail entre 16h30 et 18h30, et loisirs et sorties de 20h00 à 22h00. Les résultats sont présentés sur les figures 2.27 et 2.28. Les données obtenues montrent des scénarios réalistes ; départ du domicile vers le lieu de travail le matin, départ du lieu de travail vers les commerces ou les domiciles entre 11h45 et 12h30 puis retour au travail entre 13h30 et 14h15, départ du travail en fin d'après midi, et enfin loisirs et autre durant la soirée.

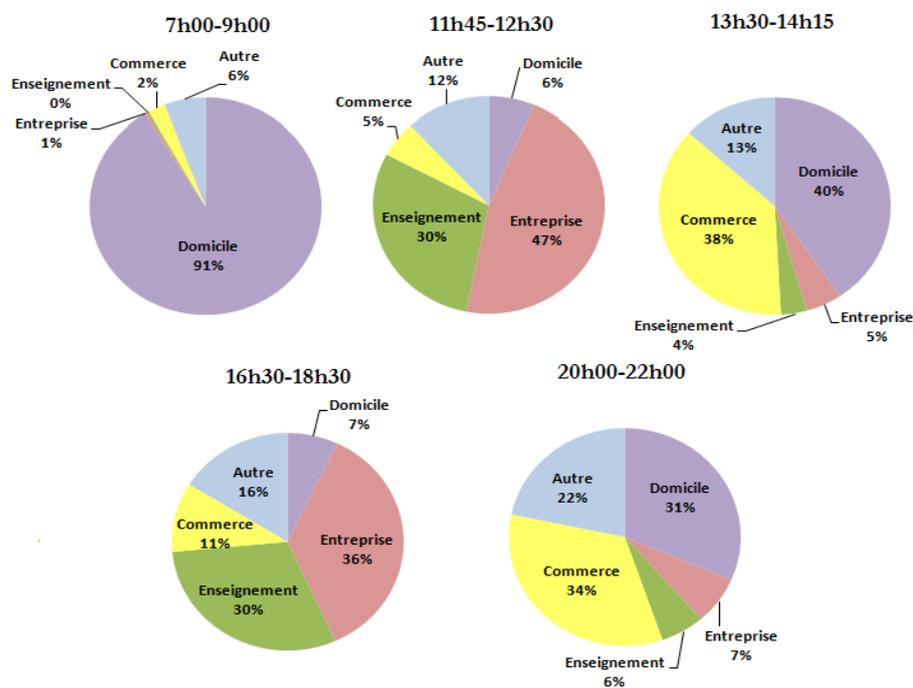


FIGURE 2.28 – Flux de déplacement sortants.

2.5 Synthèse

Le nouveau modèle de mobilité, V-MBMM, présenté dans ce chapitre est inspiré du modèle de mobilité MBMM qui simule le déplacement des individus dans une grille de mailles représentant la carte d'un environnement réel. Dans V-MBMM, les déplacements se font sur un graphe orienté pondéré qui représente la topologie d'une route aléatoire, définie par l'utilisateur ou extraite à partir de la carte d'une ville.

Des poids dynamiques sont associés à chaque route. Ils représentent le degré d'intérêt de la route pour les véhicules en déplacement à différentes périodes de la journée. Leurs valeurs

sont soit définies par défaut soit déduites à partir de données réelles qui renseignent d'une part sur le taux de présence des individus dans les différentes zones de l'environnement simulé et d'autre part sur les caractéristiques géographiques et socioéconomiques des structures de l'environnement. Ces poids sont utilisés pour guider les véhicules sur la route et rendre la distribution spatiale et temporelle des véhicules plus réaliste.

Les déplacements des véhicules sont définis dans le modèle proposé en se basant sur le concept d'activités. Afin de pouvoir simuler plusieurs catégories d'individus, les activités sont définies comme étant le déplacement d'un véhicule d'une structure de l'environnement vers une autre structure indépendamment de la classe socioprofessionnelle de l'individu. La mobilité journalière est représentée sous forme de flux d'entrée et de sortie associés à chaque structure. Ils représentent respectivement, le taux d'individus qui se rendent à la structure et le taux d'individus qui quittent la structure durant les différentes périodes de la journée.

Trois approches peuvent être utilisées dans le modèle pour le calcul des trajectoires. La première est un pré-calcul basé sur l'algorithme du plus court chemin euclidien de Dijkstra qui prend comme critère un attribut ou une combinaison des attributs des routes (vitesse limite, longueur, attractivité...). Dans la seconde approche, la trajectoire est calculée pas-à-pas, le véhicule choisit une nouvelle direction à prendre au niveau de chaque intersection. La direction est déterminée suivant une chaîne de Markov définie en fonction des poids d'attraction des routes. L'algorithme pas-à-pas prend également en compte la congestion des routes. La dernière approche, hybride, combine les deux algorithmes, le plus court chemin sert à définir des objectifs intermédiaires entre les points origine et destination du mobile et l'algorithme pas-à-pas est par la suite utilisé pour le calcul de la trajectoire entre les objectifs intermédiaires.

Les tests de validation présentés dans ce chapitre, réalisés sur des environnements théoriques simples (Manhattan et Voronoï) et des environnements complexes réels correspondant à deux communautés d'agglomération, Belfort et Saint-Quentin-en-Yvelines (CAB et CASQY), montrent que le modèle reproduit avec un bon degré de réalisme le comportement des conducteurs dans la vie réelle.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté les quatre modules fonctionnels que doit intégrer tout modèle de mobilité pour avoir le degré de réalisme requis pour la simulation de la mobilité des véhicules : module contraintes de mouvement, module générateur de trafic, module aspect temporel et module influence externe. Afin de montrer l'apport de V-MBMM, nous le comparons aux modèles existants en considérant ces quatre modules. Nous mettons également en évidence l'intérêt que présente chaque apport dans la simulation des réseaux véhiculaires.

Modèle	Topologie de routes			Contrôle aux intersections
	Type	Voies Multiples	Vitesse limite	
STRAW	TIGER	Non	Non	Stop Feux de signalisation
VanetMobiSim	Utilisateur Aléatoire TIGER/GDF	Oui	Oui	Stop Feux de signalisation
MMTS	Suisse	Oui	Oui	Non
UDel	ESRI	Oui	Oui	Stop
SUMO	Utilisateur Aléatoire TIGER	Oui	Oui	Stop Feux de signalisation
CARISMA	ESRI	Oui	Oui	Stop
V-MBMM	Aléatoire Utilisateur Fichiers de formes	Oui	Oui	Feux de signalisation

TABLE 2.16 – Comparaison des caractéristiques des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.

Les tableaux 2.16 et 2.17, repris du chapitre 1 (tableaux 1.2 et 1.3) comparent les modèles contraintes de mouvement et génération de trafic des modèles de mobilité présentés au chapitre 1 avec le modèle V-MBMM. Le principal apport de V-MBMM, qui constitue son originalité, est l'intégration des informations sur l'attractivité des lieux et les caractéristiques du terrain dans la définition du schéma de mobilité. Ces deux critères ont une grande influence sur la répartition de la population dans l'environnement simulé. Les principaux mécanismes qui définissent cette répartition sont le calcul de la trajectoire et la détermination des points origine et destination. Dans tous les modèles présentés dans le tableau, à l'exception de UDel, SUMO et V-MBMM, l'itinéraire est soit pré-calculé suivant le plus court chemin soit défini de manière aléatoire à chaque intersection. UDel et SUMO se basent sur des données statistiques et V-MBMM se base sur des données d'attractivité. Pour déterminer les points origine destination, les modèles les plus complets intègrent activité et pôles attracteurs dans le calcul. V-MBMM se base sur l'attractivité, qui implicitement inclut les pôles attracteurs puisque les valeurs d'attractivité sont calculées en fonction de l'attractivité des lieux, des activités, et également des caractéristiques des infrastructures. Ces critères donnent plus de réalisme au modèle dans lequel la répartition n'est pas aléatoire mais définie en fonction des caractéristiques et statistiques sur l'environnement simulé. Tout comme dans un cas réel, la distribution de la population n'est pas uniforme, la densité des véhicules peut être forte à certains endroits et faibles à d'autres.

Modèle	Itinéraire	Direction aux intersections	Comportement	Vitesse	C. Voies	O-D
STRAW	RWalk CC	Stochastique Prédéfinie	CFM	Progressive	Non	Aléatoire
VanetMobi Sim	RWP CC(densité/ vitesse)	Stochastique Prédéfinie	CFM	Progressive	Oui	Aléatoire Activités P. A
MMTS	CC (conges- tion)	Prédéfinie	Automates cellulaires	Progressive	Oui	Activités
UDel	RWalk	Stochastique	CFM	Progressive	Oui	Activités
SUMO	RWalk CC CC	Stochastique	CFM	Progressive	Oui	Aléatoire Activité P. A
CARISMA	CC(densité/ vitesse)	Prédéfinie	CFM	Progressive	Non	Aléatoire
V-MBMM	CC(A.R/Att) Pas-à-pas Hybride	Prédéfinie Attractivité	CFM	Progressive	Oui	Aléatoire Attractivité C. Infr Activités

C. Voies : changement de voies, O-D : Origine-Destination, P.A : Pôles attracteurs,

CC : Court chemin, RWalk : random walk, CFM : Car Following Model

A.R : Attributs de la route, Att : Attractivité, C. Infr : caractéristiques des infrastructures

TABLE 2.17 – Comparaison des générateurs de trafic des modèles de mobilité pour réseaux véhiculaires.

La répartition des mobiles est très importante dans les réseaux véhiculaires, elle influence considérablement la connectivité radio entre véhicules et la congestion des données transmises sur le réseau. A titre d'exemple, les problèmes de partitionnement du réseau et du broadcast storm peuvent ne pas apparaître dans une modélisation irréaliste dans laquelle les véhicules sont uniformément répartis dans l'environnement. Dans les scénarios réels, la distribution des véhicules n'est pas homogène, les véhicules en déplacement forment des groupes isolés concentrés dans les différentes zones attractives de l'environnement. La densité dans les zones les plus attractives est la plus élevée et peut causer le problème du broadcast storm.

L'intégration de l'aspect temporel au modèle de mobilité influence également la répartition et la densité de la population dans l'environnement. Cet aspect est pris en compte dans le modèle V-MBMM par trois éléments : la définition de taux de mobilité par période, l'utilisation de différentes lois de distribution de la mobilité par période et, la définition d'activités par période et de taux de mobilité par activité. La mobilité le long d'une journée n'est donc pas uniforme mais dépend de la période simulée.

D'un point de vue influence externe, le modèle offre une certaine flexibilité qui permet de changer le schéma de mobilité à tout instant. Les principales applications envisagées pour les réseaux véhiculaires ont pour objectif de fournir aux conducteurs des informations sur les conditions du trafic et tout évènement qui peut perturber la circulation. Les conducteurs adaptent leur parcours en fonction de ces informations. A notre connaissance, V-MBMM est le seul modèle qui considère un graphe pondéré, cette propriété peut être exploitée pour intégrer l'effet des évènements externes et les conditions du trafic sur le schéma de mobilité. L'utilisation des poids d'attraction pour guider le mouvement des véhicules et le calcul pas-à-pas et hybride de la trajectoire permettent de simuler des phénomènes externes qui peuvent se produire et changer les caractéristiques de l'environnement. Ces phénomènes peuvent être simplement modélisés en prenant en compte leur impact dans le calcul des poids d'attraction des routes. Des exemples de ces phénomènes sont les accidents, dans ce cas il suffit de diminuer, à l'instant où l'accident se produit, le pouvoir attractif des routes menant vers le lieu de l'accident qui n'attireront alors plus les véhicules ; ou des travaux routiers temporaires, dans ce cas le pouvoir attractif des routes concernées par les travaux peut être mis à zéro, aucun véhicule ne peut par conséquent emprunter ces routes.

Dans le chapitre suivant, nous présentons le modèle de propagation radio défini pour les réseaux véhiculaires que nous avons utilisé en association avec V-MBMM pour l'étude de la connectivité radio et des performances des protocoles de routage dans les VANET.

Chapitre 3

Propagation et connectivité radio dans les VANET

L'étude des caractéristiques d'un système constitue un bon point de départ pour la conception des solutions les plus performantes. Le principal paramètre qui caractérise les réseaux mobiles est la connectivité radio. L'étude de la connectivité revient à identifier les propriétés de la topologie du réseau et la manière dont cette dernière évolue. Les deux facteurs majeurs qui définissent la topologie des réseaux véhiculaires sont les mouvements des véhicules et la dégradation des signaux radio causée par les obstacles. Pour être valide, l'étude de la connectivité doit donc s'appuyer sur les modèles de mobilité et de propagation radio les plus réalistes. C'est l'objectif de ce troisième chapitre qui est constitué de deux parties. Dans la première partie, nous présentons un nouveau modèle de propagation radio pour environnement véhiculaire qui, pour apporter plus de réalisme tient compte des caractéristiques particulières de chaque environnement et reproduit leur effet sur les signaux transmis. La deuxième partie est consacrée à l'étude de la connectivité radio dans les VANET. Les résultats présentés sont obtenus en considérant le modèle de propagation radio proposé et le modèle V-MBMM pour la simulation de la mobilité.

Ce travail a fait l'objet d'une publication dans le journal : *Telecommunication Systems* et de deux publications lors des conférences : *7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)* et *Third Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*.

Sommaire

3.1	Le modèle ERCEG	98
3.2	Modèle de propagation pour VANET	100
3.3	Connectivité radio dans les VANET	110
3.4	Conclusion	127

3.1 Le modèle ERCEG

Les auteurs de [Erceg *et al.*, 1999] ont proposé un modèle statistique du path loss pour réseaux cellulaires en environnements suburbains développé à partir de données expérimentales recueillies sur plusieurs macro-cellules à travers les USA. Les mesures ont été faites dans plusieurs zones suburbaines dans le New Jersey et autour de Seattle, Chicago, Atlanta et Dallas. Pour la plupart des endroits les arbres étaient couverts de feuilles. 95 stations de base ont été impliquées dans les mesures de hauteurs variant entre 12m et 79m. Chaque station émet des signaux en continu sur la fréquence de 1,9GHz par une antenne omnidirectionnelle en azimut d'un gain de 8,14dBi. Le mobile récepteur est une camionnette équipée d'une antenne omnidirectionnelle en azimut d'un gain de 2,5dBi montée à une hauteur de 2m et, d'un récepteur GPS (*Global Positioning System*) qui lui permet d'obtenir sa position. Les mesures ont été faites à des distances allant de quelques dizaines de mètres à 8km. Le mobile mesure le signal reçu dans la zone de couverture de chaque station de base et enregistre la puissance moyenne reçue.

Les stations de base considérées couvrent un large éventail de catégories de terrain. Autour de Seattle et dans certains endroits d'Atlanta et du New Jersey, le terrain est essentiellement vallonné avec des densités d'arbres modérées à fortes. Autour de Chicago et Dallas, et dans certains endroits d'Atlanta et du New Jersey, le terrain est pratiquement plat avec de faibles densités d'arbres. En considérant ces caractéristiques, les auteurs ont classifié le terrain en trois catégories intégrées au modèle du path loss proposé. La première catégorie, notée *A*, correspond aux terrains vallonnés avec des densités d'arbres modérées à fortes, cette catégorie représente les terrains les plus obstrués et possède les valeurs les plus élevées du path loss. La catégorie qui présente les plus faibles valeurs du path loss est la catégorie *C* qui correspond aux terrains plats avec de faibles densités d'arbres. La dernière catégorie, *B*, est intermédiaire entre les deux premières catégories; elle représente les terrains plats avec des densités d'arbres modérées à fortes et les terrains vallonnés avec des faibles densités d'arbres. Les valeurs du path loss sont incluses entre celles des deux catégories *A* et *C*.

Le modèle développé par les auteurs s'appuie sur la formule commune du path loss exprimé en fonction de deux paramètres majeurs qui sont l'exposant du path loss γ et le shadow fading s . γ permet de caractériser l'atténuation du signal en fonction de la distance, sa valeur dépend du type de l'environnement. s est une variable aléatoire ajoutée au path loss pour modéliser sa variation causée par le shadow fading. A partir de l'analyse des données recueillies, les auteurs se sont basés sur cinq principales observations pour développer le modèle :

- (i) L'exposant path loss est une variable aléatoire qui suit une distribution Gaussienne.

- (ii) L'exposant path loss dépend non seulement de la catégorie du terrain mais également de la hauteur de l'antenne de la station de base.
- (iii) La valeur de l'exposant varie d'une macro-cellule à l'autre y compris pour les macro-cellules qui appartiennent à la même catégorie de terrain.
- (iv) Le shadowing est aussi une variable aléatoire qui suit une distribution Gaussienne.
- (v) La valeur du shadowing varie d'une macro-cellule à l'autre et dans une même macro-cellule, d'une position à l'autre.

La plupart des modèles empiriques modélisent l'exposant path loss par une constante dont la valeur dépend du type de l'environnement et représentent le shadow fading par une variable aléatoire qui suit une loi de probabilité donnée, en général la loi log-normale. L'exposant path loss et le shadowing sont supposés les mêmes dans tout l'environnement.

La formule générale du path loss du modèle ERCEG est :

$$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s \quad d > d_0 \quad (3.1)$$

Dans l'équation, A est une quantité fixe qui correspond au path loss en espace libre calculé à une distance de référence d_0 selon l'équation 3.2. Dans le modèle, d_0 est fixé à $100m$ et la valeur de A est de $78dB$.

$$A = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (3.2)$$

L'exposant du path loss est une variable aléatoire Gaussienne qui dépend de la catégorie du terrain et de la hauteur de l'antenne de la station de base, h_b . La formule de l'exposant path loss est donnée par l'équation 3.3, le terme entre parenthèse dans l'équation désigne la moyenne de γ et σ_γ sa variation. a , b , c et σ_γ sont des constantes déduites à partir des données expérimentales, leurs valeurs sont propres à chaque catégorie de terrain. x est une variable Gaussienne de moyenne nulle et de variation $N[0, 1]$. Les valeurs numériques des constantes liées aux catégories de terrain sont données dans le tableau 3.1.

$$\gamma = \left(a - bh_b + \frac{c}{h_b}\right) + x\sigma_\gamma \quad 10m \geq h_b \geq 80m \quad (3.3)$$

L'équation de s est :

$$s = y\sigma \quad (3.4)$$

avec y une variable Gaussienne de moyenne nulle et de variation $N[0, 1]$ et σ la variation de s qui est également une variable Gaussienne calculée comme suit :

$$\sigma = \mu_\sigma + z\sigma_\sigma \quad (3.5)$$

Paramètres du modèle	Catégories de terrain		
	A	B	C
a	4,6	4,0	3,6
b (m^{-1})	0,0075	0,0065	0,0050
c (m)	12,6	17,1	20,0
σ_γ	0,57	0,75	0,59
μ_σ	10,6	9,6	8,2
σ_σ	2,3	3,0	1,6
h_b (m)	[10, 80]		
d_0 (m)	100		
Frequency (GHz)	1,9		

TABLE 3.1 – Valeurs des paramètres du modèle Erceg

avec μ_σ la moyenne de σ et σ_σ sa variation ; z est une variable Gaussienne de moyenne nulle et de variation $N[0, 1]$. μ_σ et σ_σ sont des constantes déduites à partir des données expérimentales et sont propres à chaque catégorie de terrain, leurs valeurs sont données dans le tableau 3.1.

3.2 Modèle de propagation pour VANET

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques uns des modèles du path loss proposés pour les réseaux véhiculaires en distinguant les modèles théoriques des modèles issus de mesures empiriques. Les modèles théoriques supposent un environnement simple structuré en une grille Manhattan et prédisent le path loss en fonction des positions des deux véhicules émetteur et récepteur sur la route. Le path loss diffère selon que les deux véhicules sont sur la même route ou non. L'insuffisance commune à tous ces modèles est qu'ils se limitent à une structure de route Manhattan, ils ne peuvent donc être appliqués à des environnements réels. De plus, ces modèles supposent que les blocs dans la grille sont similaires en termes d'obstacles. Bien que le modèle présenté dans [Nagel & Eichler, 2008] introduit une différenciation entre les blocs de la grille, il nécessite cependant des données exactes sur la position et la taille des obstacles dans chaque bloc pour le calcul du path loss.

Les modèles empiriques se basent sur une classification de l'environnement en quatre catégories, urbain, suburbain, rural et autoroute, et associent à chacune une formule du path loss. Dans la plupart des modèles proposés, pour ne pas dire tous, le path loss se base sur le modèle Two-Ray Ground, les catégories d'environnement sont différenciées en associant à chacune une valeur distincte de l'exposant path loss déduite à partir de mesures

expérimentales. Bien que ces modèles puissent être appliqués à des environnements réels, ils présentent cependant quelques limitations. Tous se basent sur une classification “grossière” de l’environnement en l’une des quatre catégories urbain, suburbain, rural ou autoroute et considèrent que tous les environnements appartenant à la même catégorie sont identiques. Ainsi, pour une même catégorie, quelque soit l’environnement réel considéré, les modèles se comporteront de la même façon. De plus, pour une même catégorie, les modèles supposent que le path loss ne dépend que de la distance qui sépare les deux véhicules communicants alors que, dans un même milieu et pour une même distance, les signaux ne subissent pas forcément la même dégradation. Dans les milieux urbains par exemple, les véhicules en déplacement auront tendance à transiter de situations en visibilité directe à des situations obstruées avec des densités d’obstacles variables. Le path loss diffère d’une situation à l’autre.

Pour répondre à ces insuffisances nous avons développé un nouveau modèle de propagation radio, **V-PROPAG** (*Vehicular Radio Propagation Model*), pour les environnements véhiculaires urbains et suburbains. Ce modèle, basé sur le modèle ERCEG, utilise des informations supplémentaires sur l’environnement permettant une meilleure prise en compte des caractéristiques particulières de chaque milieu et une modélisation plus fiable de leur impact sur la propagation des signaux transmis.

Pour être plus réaliste, le modèle V-PROPAG s’appuie sur une description plus précise de l’environnement selon les trois catégories de terrain définies dans le modèle ERCEG. Cette description consiste à diviser l’environnement en plusieurs zones et à associer à chacune d’elle l’une des catégories de terrain, *A*, *B* ou *C*. Les catégories traduisent la densité d’obstacles présents sur les zones, elles sont déterminées à partir du type et de la densité des structures présentes sur chaque zone. Le path loss que subissent les signaux transmis est calculé en fonction de la catégorie de terrain des zones situées entre les deux antennes des mobiles émetteur et récepteur.

3.2.1 Description du modèle

Le modèle V-PROPAG peut s’appliquer aussi bien à des environnements définis par l’utilisateur qu’à des environnements réels. La carte représentant l’environnement est divisée en une grille de mailles de taille identique. Chaque maille, m , est caractérisée par un triplet (p_m, c_m, h_m) dont les composantes indiquent respectivement les coordonnées en abscisses et ordonnées (position) du centre de la maille m sur la carte, la catégorie, *A*, *B* ou *C*, du terrain présent sur la maille et l’altitude de la maille. Les données de toutes les mailles sont représentées par une matrice maille/caractéristiques (coordonnées, catégorie du terrain, altitude) utilisée comme données d’entrée du modèle V-PROPAG.

Les formules utilisées pour le calcul du path loss dans le modèle V-PROPAG sont déduites à partir de celles du modèle ERCEG adaptées aux réseaux véhiculaires et aux données sur l'environnement. Le tableau 3.2 montre la différence entre les paramètres des environnements considérés dans les deux modèles. Cette différence doit être prise en compte dans le calcul du path loss.

Paramètre	ERCEG	V-PROPAG
Représentation de l'environnement	carte d'une ville	carte d'une ville divisée en une grille de mailles
Catégorie du terrain entre A_X et A_R	une seule caractérisant tout le terrain situé entre A_X et A_R	catégorie de chacune des mailles situées entre A_X et A_R
Frequence	1,9GHz	5,9GHz (DSRC)
Hauteur A_X	[12m, 79m]	1,5m
Hauteur A_R	2m	1,5m
Rayon de couverture	dizaines de mètres jusqu'à 8km	300m à 1000m (théorique DSRC)
A_X , antenne émetteur ; A_R , antenne récepteur		

TABLE 3.2 – Paramètres de l'environnement dans les modèles ERCEG et V-PROPAG.

Les paramètres du tableau peuvent être divisés en deux parties. D'une part, la fréquence et la hauteur des antennes émetteurs et récepteurs qui exigent un ajustement des valeurs des constantes du modèle ERCEG qui ne peuvent être directement appliquées aux réseaux véhiculaires. D'autre part, la représentation discrétisée en maille des données de l'environnement qui a l'avantage d'offrir une description plus précise des caractéristiques de l'environnement mais qui ajoute cependant une étape supplémentaire dans le calcul du path loss pour la détermination de toutes les mailles situées entre l'antenne de l'émetteur et celle du récepteur. Cette étape peut cependant être évitée en travaillant sur des mailles de grandes tailles (par exemple de taille égale à la couverture maximale que peut avoir une antenne). Il s'agit d'un compromis entre le temps de calcul et la précision.

L'algorithme ainsi que les équations du calcul du path loss entre deux antennes quelconques, A_X et A_R , sont donnés ci-dessous.

Les données résultats de l'algorithme **Algorithme 2** utilisées pour le calcul du path loss sont le vecteur N_c et la distance d . Contrairement à tous les modèles de la littérature qui considèrent un terrain plat, le modèle V-PROPAG tient compte de l'altitude du terrain qui peut également influencer la propagation des signaux radio. Un signal transmis par une voiture en hauteur se propage mieux qu'un signal transmis par une voiture qui se trouve dans un terrain plat. De plus, dans certains cas, l'altitude du terrain qui sépare les deux véhicules peut être plus élevée et empêcher toute propagation du signal. Toutes ces configurations sont prises en compte dans le modèle en se basant non seulement sur la

Algorithme 2: Calcul du path loss avec le modèle V-PROPAG.

Données :

 E , ensemble des mailles de l'environnement, $E = \{m(p_m, c_m, h_m)\}$. XY_X , coordonnées du véhicule (antenne) émetteur A_X . XY_R , coordonnées du véhicule (antenne) récepteur A_R .

Variables :

 M , sous-ensemble de E contenant les mailles situées entre A_X et A_R N_c , vecteur de trois valeurs qui représentent le nombre de mailles traversées par le signal par catégorie de terrain A , B et C H_d , différence de hauteur entre les antennes émetteur et récepteur

Initialisation :

 $M := \emptyset$ $N_t := [0, 0, 0]$ **début**déterminer la maille, m_X , sur laquelle se trouve le véhicule A_X déterminer la maille, m_R , sur laquelle se trouve le véhicule A_R $H_d := |h_{m_X} - h_{m_R}|$ $d :=$ distance euclidienne entre A_X et A_R déterminer l'équation de la droite qui relie le centre de m_X à celui de m_R déterminer l'ensemble M des mailles coupées par la droite**pour chaque** $m \in M$ **faire** **si** $obstacle(h_m, H_d + h_b)$ **alors** \\haute altitude entre m_X et m_r qui empêche la visibilité entre A_X et A_R pas de signal au niveau de A_R **fin** **sinon** récupérer le numéro de la catégorie, t , de la maille m $N_c[t] := N_c[t] + 1$ **fin****fin**

calcul du path loss selon l'équation 3.6

fin

hauteur de l'antenne dans le calcul du path loss mais également sur l'altitude des mailles.

La formule du path loss est :

$$PL = \begin{cases} A + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + s & d \leq d_0 \\ 20\gamma \log_{10}(4\pi d/d_0) + s & d > d_0 \end{cases} \quad (3.6)$$

A est le path loss en espace libre calculé suivant l'équation 3.2 à la fréquence de 5,9GHz. L'exposant path loss et le shadow fading utilisés dans l'équation 3.6 sont des moyennes calculées en considérant les catégories de terrain de toutes les mailles situées entre m_X et m_R (les mailles de l'ensemble M). Ils sont calculés suivant les équations 3.7 à 3.8.

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T (a_t - b_t h_b + \frac{c_t}{h_b}) N_c[t] + x \sigma_\gamma N_c[t] \quad 1,5m \geq h_b \geq 30m \quad (3.7)$$

$$s = y(\mu_\sigma + z\sigma_\sigma) \quad (3.8)$$

avec

$$\sigma_\gamma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sigma_{\gamma_t} N_c[t] \quad (3.9)$$

$$\mu_\sigma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \mu_{\sigma_t} N_c[t] \quad (3.10)$$

$$\sigma_\sigma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sigma_{\sigma_t} N_c[t] \quad (3.11)$$

Dans toutes les équations, X_t désigne le paramètre X de la catégorie t , N le nombre de mailles situées sur la droite qui relie les deux mailles m_X et m_R et T le nombre de catégories qui est égal à 3. h_b dans l'équation 3.7 est la différence entre l'altitude des mailles m_X et m_r à laquelle est ajoutée la hauteur de l'antenne.

Paramètres du modèle	Catégories de terrain		
	A	B	C
a	3,5	2,9	2,3
b (m^{-1})	0,004	0,003	0,002
c (m)	0,6	0,65	0,75
σ_γ	0,13	0,22	0,15
μ_σ	1,5	0,94	0,72
σ_σ	0,35	0,75	0,54
h_b (m)	[1,5, 30]		
d_0 (m)	32		
Frequency (GHz)	5,9		

TABLE 3.3 – Valeurs des paramètres du modèle V-PROPAG

Le tableau 3.3 montre les valeurs des constantes du modèle V-PROPAG adaptées aux réseaux véhiculaires. Pour déterminer ces valeurs, nous nous sommes basé sur l'analyse et les conclusions présentées par les auteurs de [Erceg *et al.*, 1999] et expliquées dans la

section 3.2.2. Nous avons effectué plusieurs tests pour ajuster et valider les valeurs trouvées en ayant pour référence le comportement du modèle ERCEG. Les catégories de terrain sont définies, dans le cas des réseaux véhiculaires, en fonction de la densité d'obstacles (bâtiments, arbres, etc.) présents dans l'environnement. La catégorie *A* correspond aux zones à forte densité d'obstacles, la catégorie *B* aux zones à moyenne densité d'obstacles et la catégorie *C* représente les zones à faible densité d'obstacles.

3.2.2 Validation du modèle

L'analyse de Erceg et al. a montré que les deux paramètres qui influencent le path loss dans chaque catégorie sont la distance entre les deux mobiles émetteur et récepteur et la hauteur des antennes. Le degré d'influence de ces paramètres sur la puissance reçue diffère selon la catégorie du terrain situé entre les deux mobiles. D'une manière générale, la puissance reçue est proportionnelle à la hauteur de l'antenne émettrice et inversement proportionnelle à la distance émetteur-récepteur. Plus l'antenne est haute meilleur est le signal reçu et plus la distance émetteur-récepteur est élevée plus faible est le signal reçu. En considérant séparément les trois catégories de terrain définies dans le modèle, la catégorie *C*, étant la moins obstruée, est la plus sensible à la variation de la hauteur de l'antenne. Il suffit d'augmenter de peu la hauteur de l'antenne pour éviter les quelques obstacles de l'environnement, contrairement à la catégorie *A* dans laquelle la puissance reçue augmente plus lentement avec l'augmentation de la hauteur de l'antenne de l'émetteur. De manière inverse, la catégorie *A* est la plus sensible à la variation de la distance émetteur-récepteur. La densité d'obstacles étant plus forte, l'influence de la distance est plus importante compte tenu du fait qu'en se propageant, le signal rencontre plus d'obstacles que dans la catégorie *C*. La catégorie *B* est intermédiaire entre les deux catégories *A* et *C*.

Nous avons réalisé les premiers tests dans l'objectif de démontrer que le modèle V-PROPAG se comporte de la même manière que le modèle ERCEG. Les figures 3.1 et 3.2 montrent le path loss obtenu, respectivement avec le modèle V-PROPAG et le modèle ERCEG en considérant des terrains plats. Le path loss est donné avec un signe négatif sur l'ensemble des figures pour l'indiquer comme une perte. La hauteur de l'antenne (h_b) dans le modèle ERCEG est positionnée à $25m$ et le gain des antennes émettrice et réceptrice à $2dBi$. Dans le modèle V-PROPAG, la hauteur est positionnée à $1,5m$ et le gain à $2dBi$. Le path loss est calculé à des distances régulières pour chaque modèle, allant de $100m$ à $1500m$ avec un pas de $100m$ pour le modèle ERCEG et de $25m$ à $500m$ avec un pas de $25m$ pour le modèle V-PROPAG. Les figures 3.1.(a) et 3.2.(a) montrent les valeurs obtenues avec 200 antennes et les figures 3.1.(b) et 3.2.(b) la moyenne des valeurs et leur écart type. Les résultats montrent que dans les deux modèles le path loss augmente avec l'augmentation de la distance, l'impact de la distance étant plus important dans la catégorie *A* suivie

de B puis de C . On remarque également que la distinction entre les catégories est plus notable avec V-PROPAG qu'avec ERCEG. Ceci peut s'expliquer par le fait que la hauteur des antennes est plus faible dans les réseaux véhiculaires et par conséquent l'influence des obstacles est plus importante. En d'autres termes, en utilisant des antennes plus hautes, le signal radio évite plus d'obstacles qu'avec des antennes à faible hauteur.

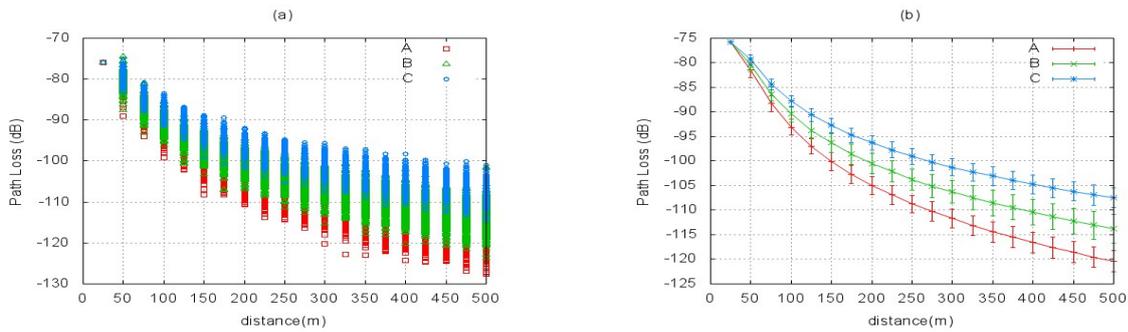


FIGURE 3.1 – Variation du path loss en fonction de la distance - V-PROPAG.

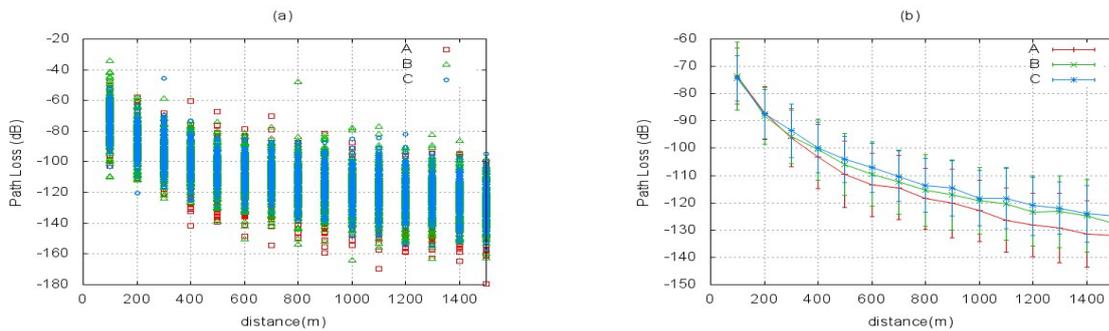


FIGURE 3.2 – Variation du path loss en fonction de la distance - ERCEG.

Les figures 3.3 et 3.4 tracent la variation du path loss en fonction de la distance et de la hauteur des antennes pour chacune des catégories du terrain. Les résultats montrent qu'avec des antennes plus hautes, le path loss devient plus faible. Pour les mêmes raisons énoncées précédemment, le path loss est impacté plus fortement par la variation de hauteur d'antenne avec la catégorie C suivie de B puis de A . En passant d'une antenne de $10m$ à une antenne de $80m$, le gain sur le path loss, obtenu avec le modèle ERCEG, est de $+13,41dBm$ pour la catégorie A , $+14,62dBm$ pour la catégorie B et $+16,95dBm$ pour la catégorie C . Chaque valeur est la moyenne des différences du path loss calculées sur toutes les distances. Avec le modèle V-PROPAG, en passant d'une antenne de $1,5m$ à une antenne de $30m$, les moyennes des gains sur le path loss sont respectivement de $+3,96dBm$, $+4,20dBm$ et $+4,71dBm$.

Les résultats de validation présentés jusqu'à présent dans ce chapitre sont obtenus

en considérant un environnement non maillé¹, l'objectif étant de valider la valeur des paramètres du modèles.

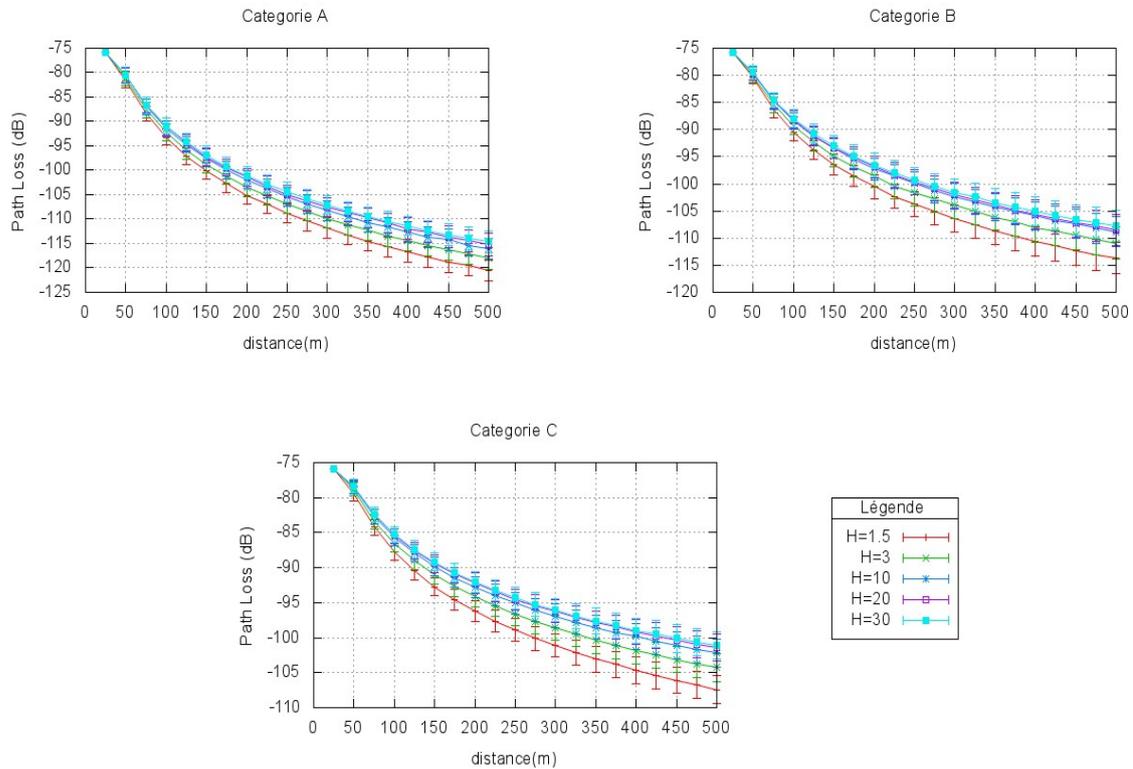


FIGURE 3.3 – Variation du path loss en fonction de la hauteur des antennes - V-PROPAG.

Dans la seconde série de tests, nous avons défini un environnement divisé en mailles et nous avons calculé le path loss en faisant varier les caractéristiques de cet environnement. L'objectif étant la validation des équations du modèle qui sont définies pour des environnements homogènes (*A* ou *B* ou *C*) et mixtes (*A* et *B* et *C*) représentés par une grille de mailles.

Les résultats présentés sur les figures 3.5 et 3.6 sont obtenus sur un espace de $3km \times 3km$ structuré en une grille Manhattan. Les mailles sont de taille égale à $25m \times 25m$, les routes ont une largeur de $25m$ et les blocs une taille de $300m \times 300m$. Les tests sont réalisés en faisant varier la catégorie et l'altitude des mailles de la grille. Dans chaque test, le path loss est calculé en supposant que l'antenne émettrice se trouve au centre d'une maille route. Les valeurs représentées sur les graphes sont des moyennes calculées sur toutes les mailles routes, c'est à dire en positionnant à chaque test l'antenne émettrice sur l'une des mailles

1. Le calcul du path loss se fait selon l'algorithme 2 et l'équation 3.6 en fixant la taille des mailles à une valeur supérieure ou égale à la zone de couverture maximale d'une antenne.

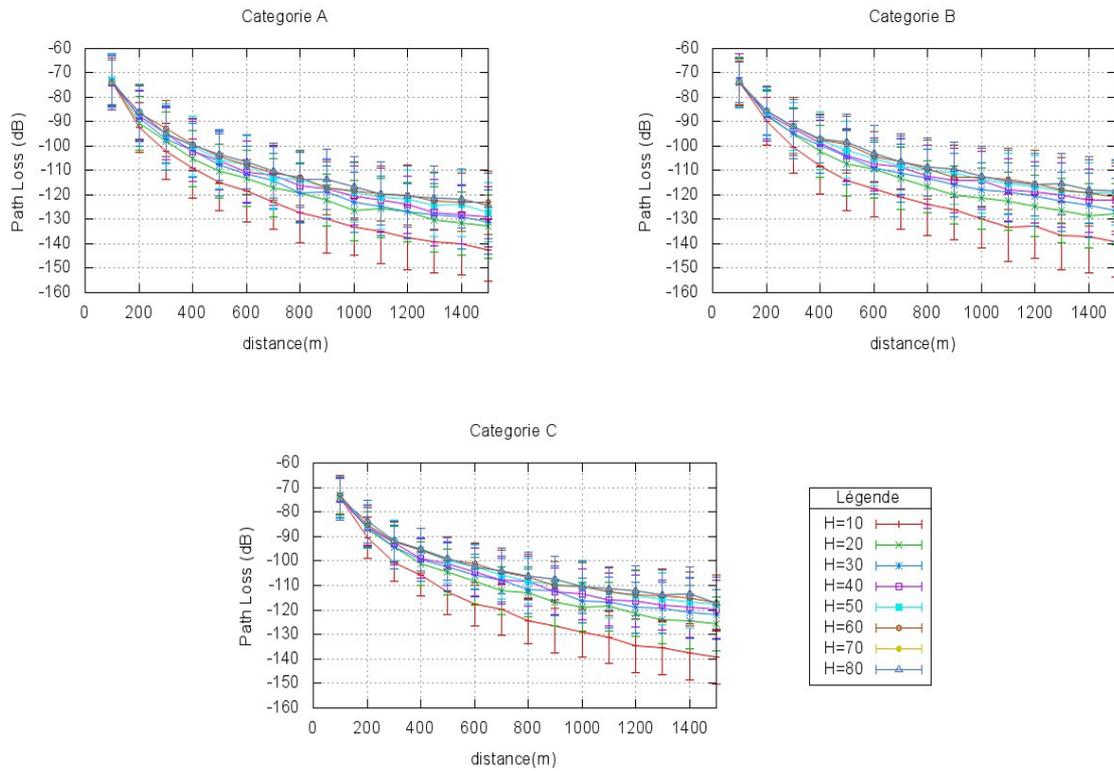


FIGURE 3.4 – Variation du path loss en fonction de la hauteur des antennes - ERCEG.

route. Pour chaque position, le path loss est calculé au niveau de toutes les mailles situées au voisinage de l'antenne émettrice.

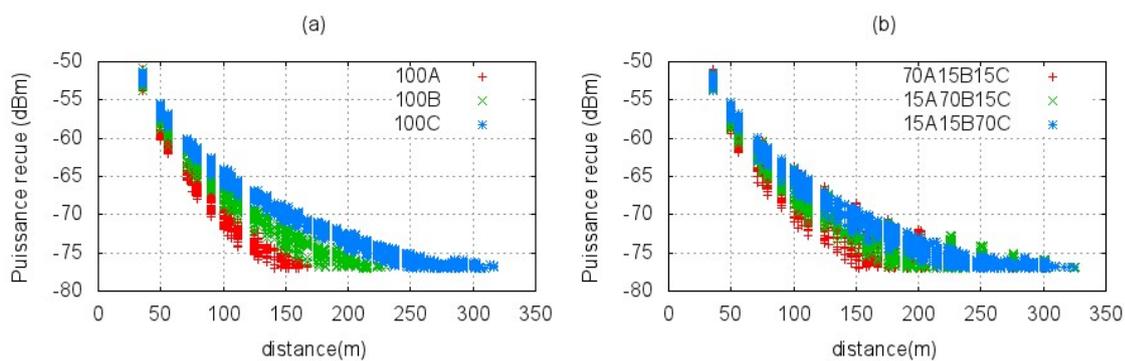


FIGURE 3.5 – Puissance reçue : grilles Manhattan homogènes (a) et mixtes (b).

Six grilles à terrain plat et différentes répartitions de mailles par catégorie de terrain ont été considérées dans les tests. Les figures 3.5 et 3.6 représentent les résultats obtenus avec 200 antennes émettrices aléatoirement choisies sur la route. La première figure représente

la puissance reçue par les 200 antennes en fonction de la distance et la seconde représente le rayon moyen des antennes et le nombre moyen de mailles couvertes par chaque antenne pour un seuil de réception à $-77dBm$. Le rayon d'une cellule est défini par la distance euclidienne entre la maille de l'émetteur et la maille la plus éloignée de la couverture. Les légendes de la figure 3.5 indiquent le taux de mailles par catégorie de terrain de chacune des grilles. Par exemple, 100A indique une grille avec 100% de mailles de catégorie A (terrain homogène) et 70A15B15C indique une grille avec 70% de mailles de catégorie A, 15% de catégorie B et 15% de catégorie C (terrain mixte). La répartition des catégories sur la grille est aléatoire. Les caractéristiques des antennes sont : puissance d'émission $23dBm$, gain d'antenne $2dBi$, hauteur de l'antenne $1,5m$, fréquence d'émission $5,9GHz$ et sensibilité $-77dBm$. Ces valeurs permettent d'avoir un rayon de couverture d'environ $500m$ avec le modèle Two-Ray Ground.

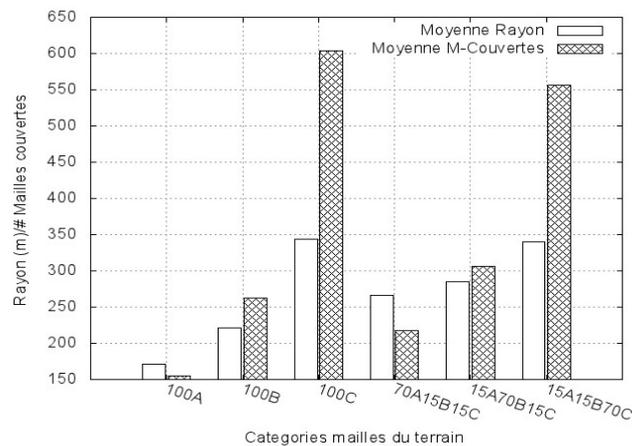


FIGURE 3.6 – Nombre moyen de mailles couvertes et rayons moyens : grilles Manhattan à terrains homogènes et mixtes.

Remarque : dans toute la suite de la thèse on notera TRG le modèle Two-Ray Ground.

Les valeurs de puissance représentées sur la figure 3.5.(a) montrent que lorsque toutes les mailles de la grille sont du même type, 100% A, 100% B, ou 100% C, les puissances obtenues avec les trois catégories sont bien distinguées. Avec des grilles à terrain mixte, le signal peut traverser les mêmes catégories de terrain dans deux grilles différentes et enregistrer la même perte du signal, d'où le chevauchement des valeurs de puissance reçue dans les trois grilles 70A15B15C, 15A70B15C et 15A15B70C, comme le montre la figure 3.5.(b). Les résultats de la figure 3.6 montrent que les antennes ont une meilleure couverture dans les environnements les moins obstrués. L'ordre de croissance de la valeur moyenne du rayon de couverture et du nombre moyen de mailles couvertes par une antenne suit le niveau d'obstruction des grilles. Les plus grandes valeurs sont obtenues avec la grille 100C suivie de 15A15B70C puis de 15A70B15C puis de 100B puis de 70A15B15C et enfin de 100A.

Le dernier paramètre qui reste à valider dans le modèle est l'influence de l'altitude du terrain sur le path loss en considérant des environnements maillés. Nous avons repris les six grilles et positionné l'altitude des mailles route à 0m, 2m puis 4m. La figure 3.7 montre les valeurs moyennes du rayon et du nombre de mailles couvertes de 200 antennes émettrices positionnées sur des mailles route choisies de manière aléatoire. Les antennes ont une hauteur de 1,5m du sol. La même explication peut être donnée pour la différence des résultats entre les six grilles. En comparant, pour chacune des grilles, les résultats obtenus avec les trois altitudes, nous pouvons constater que la couverture est meilleure avec les antennes à haute altitude. En effet, les signaux émis par des antennes en hauteur se propagent mieux puisqu'ils rencontrent moins d'obstacles.

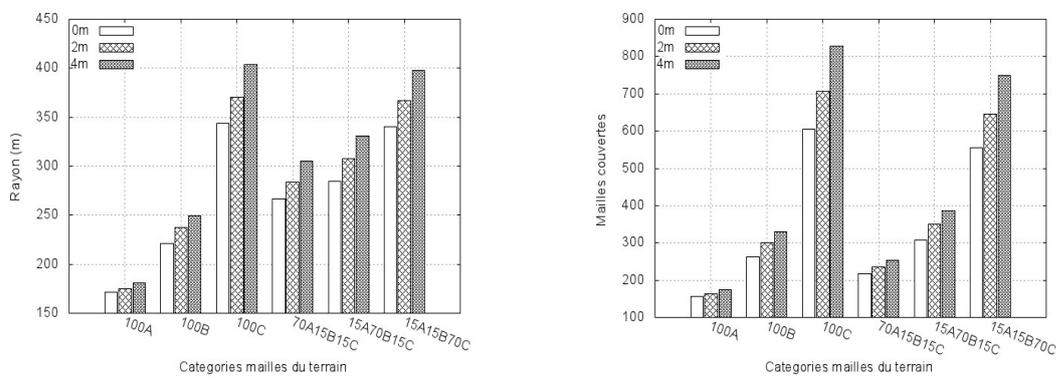


FIGURE 3.7 – Nombre moyen de mailles couvertes et rayons moyens vs. altitude du terrain.

L'ensemble des tests de validation réalisés dans cette première partie du chapitre montre que le modèle V-PROPAG reproduit fidèlement l'effet des obstacles sur la propagation des signaux en se basant sur des informations plus précises sur l'obstruction des terrains en tenant compte des variations de hauteur du sol et de la densité des obstacles du sur-sol. Les tests montrent également que le modèle est correctement adapté, à partir du modèle ERCEG, aux réseaux véhicules et tient compte de toutes les observations présentées dans [Erceg *et al.*, 1999]. Ces facteurs nous permettront d'avoir une sensibilité de la connectivité des VANET aux terrains, cependant, des mesures spécifiques seront nécessaires pour calibrer les paramètres de la table 3.3 selon les villes.

3.3 Connectivité radio dans les VANET

Durant ces dernières années plusieurs protocoles, mécanismes et applications ont été proposés pour les réseaux véhiculaires. Les solutions efficaces sont celles qui tiennent compte des caractéristiques du réseau qui diffèrent d'une classe de réseau à une autre. Les protocoles développés pour les MANET sont par exemple non adéquats pour les VANET,

ils considèrent des mobiles à faible et moyenne mobilité et densité. L'étude et l'analyse des caractéristiques du réseau constituent un bon point de départ pour la conception de solutions efficaces. C'est l'objectif de cette seconde partie du chapitre dans laquelle nous étudions les caractéristiques, d'un point de vue connectivité radio, des VANET dans des environnements urbains et suburbains.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude de la connectivité radio dans les réseaux véhiculaires. Dans [Wang, 2005] et [Artimy *et al.*, 2004] les auteurs ont étudié les caractéristiques de la connectivité radio entre véhicules se déplaçant sur une autoroute. Dans [Wang, 2005], l'autoroute est représentée par un rectangle dont chaque route est à voies multiples. Les traces de mobilité sont générées par le simulateur VisSim. Tous les véhicules sont supposés avoir la même zone de couverture représentée par un cercle parfait autour de chacun. Les auteurs ont analysé la durée de vie des routes, en termes de connectivité radio, entre tout couple de véhicule dans le réseau en faisant varier la valeur du rayon de couverture. Dans [Artimy *et al.*, 2004], l'autoroute est représentée par un seul segment de route à voies multiples. La mobilité des véhicules est simulée par le modèle Nagel-Schreckenberg qui se base sur les automates cellulaires pour définir le comportement de chaque véhicule. Les auteurs ont considéré des conditions de trafic fluide où chaque véhicule se déplace à sa vitesse maximale. Les zones de couverture radio sont également représentées par des cercles parfaits d'un même rayon autour de chaque véhicule. Les auteurs ont analysé l'effet de la densité des véhicules, de leur vitesse et de la distance inter-véhicules sur la durée des connexions radio entre véhicules.

Les résultats présentés dans [Conceição *et al.*, 2008] sont obtenus dans un environnement de simulation représentant la carte d'une ville réelle, Porto au Portugal. Dans le modèle de mobilité utilisé, les intersections sont régulées par les feux de signalisation ou les règles de priorité. Les points origine-destination sont générés de manière aléatoire ou définis par l'utilisateur en tenant compte des statistiques sur le trafic routier dans Porto. L'itinéraire est calculé suivant l'algorithme du plus court chemin et le comportement de chaque véhicule est déterminé en fonction des véhicules qui le précèdent et des caractéristiques des routes. De même que dans [Wang, 2005] et [Artimy *et al.*, 2004], la zone de couverture de chaque véhicule est représenté par un cercle parfait. Les auteurs ont analysé le degré moyen des nœuds en faisant varier les flux de trafic et la taille des zones de couverture. Les auteurs ont également défini un algorithme de calcul de la connectivité transitive dans le but d'analyser la variation des connexions multi-saut. Les mêmes auteurs ont présenté dans un autre travail [Conceição *et al.*, 2009] une étude comparative de la connectivité radio dans les VANET en considérant en plus du modèle utilisé dans [Conceição *et al.*, 2008] le modèle Random Waypoint et Manhattan Grid. L'objectif étant de démontrer l'impact d'une modélisation réaliste de la mobilité sur les caractéristiques du réseau. Un autre travail de ce genre est celui réalisé par Fiore et al. [Fiore & Härrri, 2008]

qui ont considéré plusieurs modèles de mobilité utilisant différents mécanismes et niveaux de réalisme et ont étudié l'influence de la modélisation de la mobilité sur la topologie du réseau. La structure de la route considérée dans l'article est une grille Manhattan. La zone de couverture de chaque véhicule est également représentée par un cercle parfait.

Récemment, Viriyasitavat et al. ont présenté dans [Viriyasitavat *et al.*, 2011] une étude analytique et par simulation de la connectivité radio des véhicules en environnement urbain. La topologie de la route est représentée par une grille Manhattan avec des feux de signalisation placés au niveau de chaque intersection. Le modèle de mobilité utilisé se base sur les automates cellulaires. Les points origine-destination de chaque véhicule sont déterminés aléatoirement et les itinéraires sont calculés suivant l'algorithme du plus court chemin. Les zones de couverture sont modélisées par un cercle parfait autour de chaque véhicule. Pour modéliser l'effet des obstacles sur la propagation des signaux radio, deux valeurs de rayon de couverture sont utilisées $140m$ et $250m$. Le rayon est positionné à $250m$ si les deux véhicules sont en visibilité directe et à $140m$ dans le cas contraire. Dans leur étude, les auteurs ont considéré deux types de réseaux, des réseaux fortement connectés dans lesquels il est possible de trouver une route, multi-saut ou à un saut entre tout couple de véhicules, et des réseaux à connectivité moyenne dans lesquels il existe des nœuds qui n'ont pas de route vers d'autres nœuds. Les métriques étudiées dans le cas des réseaux fortement connectés sont la durée moyenne des liens directs (un saut) et la durée moyenne des routes. Dans le cas des réseaux à moyenne connectivité, le problème étant le partitionnement du réseau, les auteurs ont étudié la durée d'attente pour rétablir une route interrompue.

Les résultats issus de l'ensemble des travaux sont des valeurs caractérisant la dynamique de la connectivité radio dans les VANET. Leur prise en compte dans la conception des applications et protocoles de routage pour les VANET devrait permettre d'optimiser les performances du réseau. Pour atteindre cet objectif, les résultats doivent être valides. Cependant, l'inconvénient commun à tous les travaux est le manque de réalisme dans la modélisation des VANET. D'un point de vue propagation radio, tous les travaux se basent sur une modélisation irréaliste qui considère les zones de couverture des véhicules comme des cercles parfaits de même rayon. Cette modélisation suppose qu'il n'existe aucun obstacle dans l'environnement et il ne suffit pas de diminuer la taille des rayons de couverture pour modéliser l'effet des obstacles même en environnement homogène. Les zones de couverture sont loin d'être des cercles parfaits.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont obtenus en utilisant le modèle V-MBMM pour la simulation de la mobilité et le modèle V-PROPAG pour la propagation radio. L'étude est faite sur un environnement réel qui est la CAB. Afin de démontrer l'intérêt d'une modélisation réaliste de la propagation radio nous présentons à titre comparatif les

résultats obtenus avec le modèle le plus communément utilisé qui est le TRG.

3.3.1 Modélisation et caractérisation de la connectivité

L'objectif visé par notre étude est double. Nous voulons d'une part montrer l'impact d'une modélisation réaliste de la propagation radio qui est essentiel dans les réseaux véhiculaires compte tenu du fait que les signaux, dans ces réseaux, se propagent en milieu externe et sont par conséquent sujets à de sévères dégradations. Le second objectif de l'étude est d'analyser et d'identifier les propriétés concernant la connectivité radio dans les VANET, propriétés qui doivent être prises en compte dans la conception de toute nouvelle solution de routage.

Nous avons développé une architecture à quatre modules pour l'analyse des caractéristiques de la connectivité radio dans les VANET, comme le montre la figure 3.8. Les données de chaque module, à l'exception du module propagation radio, sont générées et/ou mises à jour périodiquement toutes les T secondes (par exemple toutes les 2 secondes).

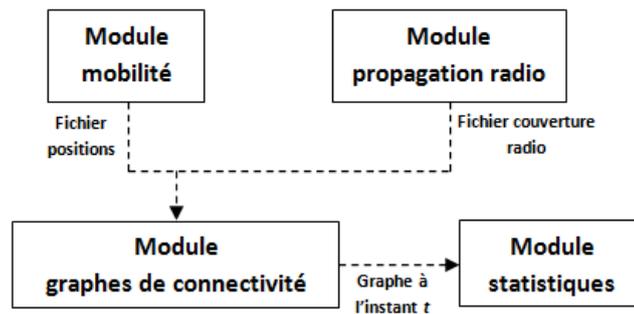


FIGURE 3.8 – Architecture modulaire pour l'analyse de la connectivité radio.

a. Module mobilité

Le premier module, *Module mobilité*, a pour rôle de déterminer la position périodique de chaque véhicule dans l'environnement simulé. Le résultat est un fichier qui associe à chaque véhicule un vecteur de valeurs indiquant les positions, toutes les T secondes, par lesquelles est passé le véhicule. Les données de ce fichier sont pré-calculées et utilisées comme entrée du module graphes de connectivité. Le modèle de mobilité implémenté dans ce module est V-MBMM. La figure 3.9 montre les itinéraires générés par le module mobilité de quelques véhicules se déplaçant dans la CAB. Les positions des véhicules sont mises à jour chaque seconde. Les trajectoires en rouge sont celles des véhicules arrivés à destination (véhicules 1 et 6 sur l'exemple) et en bleu celles des véhicules en cours de déplacement. Les trajectoires en violet sont le résultat de la superposition de trajectoires en rouge et en bleu.

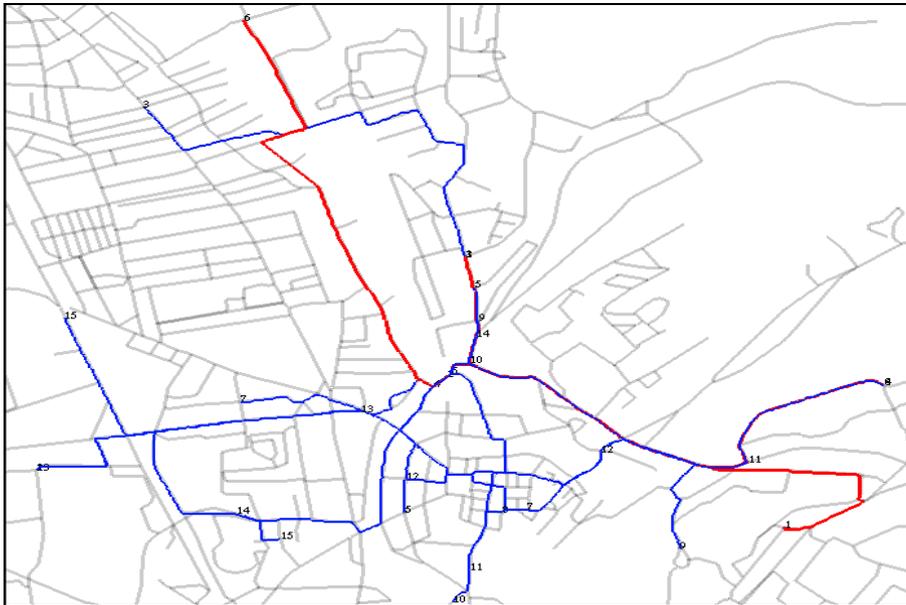


FIGURE 3.9 – Exemple de trajectoires générées par le module mobilité.

b. Module propagation radio

Le *Module propagation radio* a pour rôle de déterminer la zone de couverture radio de chaque véhicule dans le réseau. Deux modèles de propagation radio sont implémentés dans ce module, Two-Ray Ground qui représente la zone de couverture de tout véhicule par un cercle parfait et V-PROPAG qui prend en compte les obstacles de l'environnement.

Avec le modèle V-PROPAG, la zone de couverture des véhicules est calculée suivant l'algorithme 2 et les caractéristiques des antennes. Pour réduire le temps de calcul, qui peut être élevé notamment lorsque le nombre de véhicules simulés est important, les zones de couverture sont pré-calculées en considérant les points suivants :

- Le calcul de la zone de couverture d'un véhicule consiste à déterminer l'ensemble des mailles situées à une distance du véhicule inférieure à une valeur prédéfinie d_{max} . Cette valeur représente la distance maximale à laquelle la puissance du signal reçue est supérieure à la sensibilité de l'antenne.
- Le path loss entre deux véhicules est calculé en fonction des mailles sur lesquelles se trouvent les véhicules indépendamment de leurs positions précises dans les mailles. Le calcul se fait suivant l'algorithme 2 en supposant que chacun des véhicules est situé au centre de la maille à laquelle il appartient. Les véhicules situés sur une même maille se voient ainsi affecter les mêmes valeurs du path loss et par conséquent la même zone de couverture. Les zones de couverture sont donc affectées aux mailles plutôt

qu'aux véhicules et il devient inutile de recalculer la couverture pour des véhicules situés dans une même maille. Le pas de maille fixé à 25m permet d'avoir une précision suffisante sur la localisation des véhicules par rapport aux largeurs réelles des routes y compris en milieu urbain.

- Le path loss étant déterminé en fonction de données statiques sur l'environnement (catégories et altitude des mailles), il est inutile de recalculer périodiquement les zones de couverture des mailles à chaque déplacement des véhicules. Le calcul se fait une seule fois et les valeurs trouvées sont considérées identiques pour toutes les simulations. Le défaut de cette approche est l'absence de l'effet de masque entre véhicules, surtout pour la forte densité de trafic, mais il peut être pris en compte par un facteur à ajouter au modèle.

Le résultat du module propagation radio est un fichier spécifiant la zone de couverture de toutes des mailles de l'environnement simulé. C'est une matrice *mailles/mailles-couvertes* qui associe à chaque maille un vecteur spécifiant l'ensemble des mailles qu'elle couvre avec la puissance reçue au niveau de chaque maille. Pour limiter le temps de calcul et la taille des données seules les mailles routes sont considérées dans le calcul des couvertures radio étant donné que ce sont les seules positions possibles des véhicules. Les autres mailles sont uniquement considérées dans la détermination de la catégorie des terrains traversés par les signaux et donc le calcul de l'atténuation du signal. La figure 3.10 montre deux zones de couverture générées par le module propagation radio en milieu urbain à terrain mixte. Le modèle utilisé est V-PROPAG avec un maillage de 25mx25m. Seule la couverture radio au niveau des routes est représentée sur l'exemple et la dégradation de la couleur reflète la diminution de la puissance reçue. Les émetteurs se trouvent sur les routes au niveau des chiffres 1 et 2. Avec TRG, on obtiendrait des disques autour de ces points.



FIGURE 3.10 – Couvertures radio générées par le module propagation radio.

c. Module graphes de connectivité

Ce module a pour rôle la construction du graphe de connectivité entre les véhicules en fonction de leurs positions dans le réseau, de leurs zones de couverture et de leur nombre².

Les données utilisées comme entrée du module graphes de connectivité sont le fichier position, pré-calculé par le module mobilité, qui indique les positions périodiques de chacun des véhicules simulés, et le fichier couverture radio, pré-calculé par le module propagation radio, qui indique la zone de couverture de chaque maille route. A chaque période, le module graphes de connectivité récupère la position de chaque véhicule actif à partir du fichier position qu'il utilise pour déterminer sa zone de couverture à partir du fichier couverture radio. La zone de couverture d'un véhicule correspond à celle de la maille à laquelle il appartient. Les connexions entre les véhicules sont déterminées à partir de leurs zones de couverture. Un véhicule i est lié au véhicule j si le véhicule j appartient à l'une des mailles couvertes par le véhicule i .

Formellement, les connexions entre les véhicules sont représentées par un graphe $G(V, C)$ orienté dynamique. V est l'ensemble des sommets du graphe, chacun représentant un véhicule actif, C est l'ensemble des arêtes qui modélisent les connexions radio entre véhicules. Chaque élément de C est un couple (v_i, v_j) qui relie deux véhicules v_i et v_j qui peuvent communiquer. A chaque couple (v_i, v_j) est associée une orientation qui définit le type du lien radio entre v_i et v_j qui est, bidirectionnel si les véhicules v_i et v_j sont mutuellement à portée radio, ou unidirectionnel si seul l'un des deux véhicules (extrémité de l'arête) est à portée radio de l'autre (l'origine de l'arête). Cette approche nous permet d'avoir une grande précision sur l'ensemble des liens bidirectionnels, chaque véhicule pouvant être émetteur ou récepteur.

Les figures 3.11 et 3.12 illustrent des graphes de connectivité de 100 véhicules obtenus respectivement avec les modèles Two-Ray Ground et V-PROPAG. Le graphe en (b) de chaque modèle représente l'évolution, après 3mn de mobilité, du graphe en (a).

d. Module statistiques

Ce module s'exécute en parallèle avec le module graphes de connectivité et utilise le résultat de ce dernier pour l'estimation des propriétés de la connectivité radio dans les VANET.

Les principaux facteurs qui affectent la connectivité radio dans les réseaux véhiculaires sont la forte mobilité des nœuds, la diversité de leur densité et la sévère dégradation de la qualité des signaux transmis due aux obstacles, hauteurs et distances. Ces facteurs sont la cause des trois problèmes majeurs des réseaux véhiculaires qui sont la connectivité

2. Le nombre de véhicules durant une simulation n'est pas fixe, les véhicules peuvent rejoindre (au démarrage) et quitter (arrivée à destination) le réseau à des instants déterminés par le modèle de mobilité.

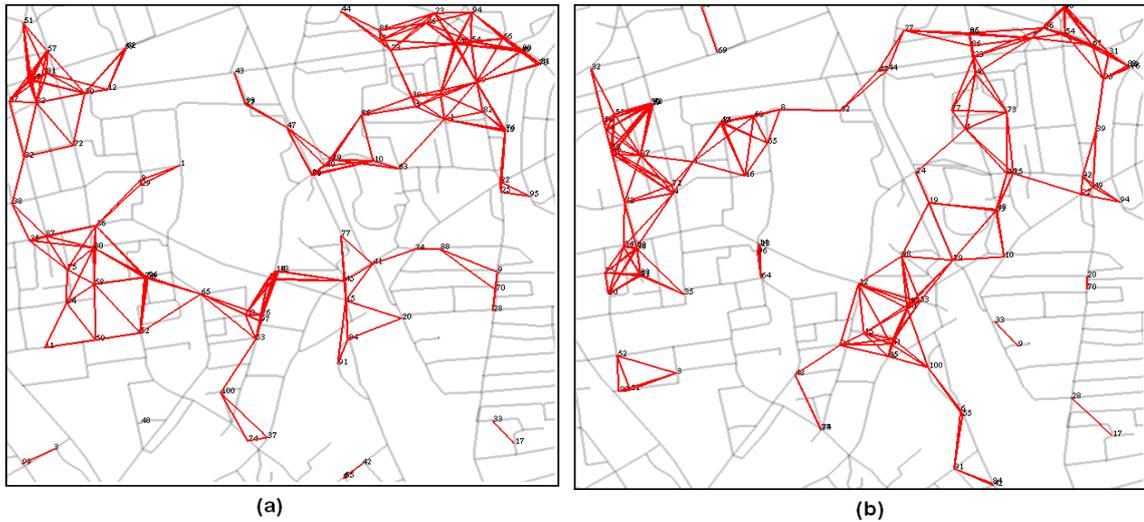


FIGURE 3.11 – Graphes de connectivité de 100 véhicules : Cas Two-Ray Ground.

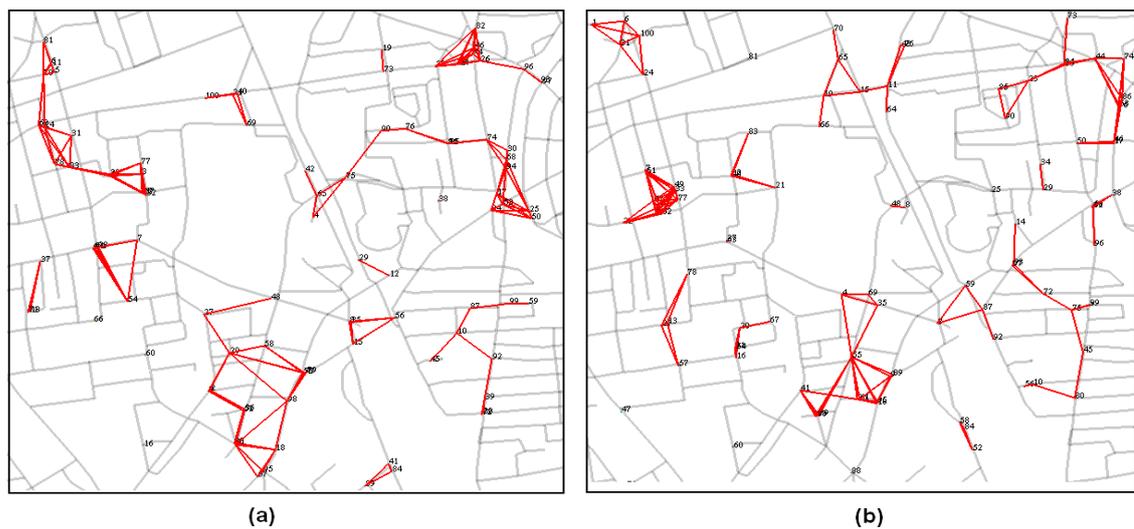


FIGURE 3.12 – Graphes de connectivité de 100 véhicules : Cas V-PROPAG.

intermittente, la fragmentation du réseau et le broadcast storm.

D'une manière générale, la connectivité radio et les problèmes qui y sont liés peuvent être caractérisés par trois métriques qui sont la durée moyenne des liens radio entre les nœuds, le nombre de nœuds liés à chacun des nœuds (degré des nœuds du graphe) et la formation de groupes isolés de nœuds dans le réseau. Ce sont ces métriques qui sont évaluées par le module statistiques à partir des graphes de connectivité générés sur toutes les périodes.

- *Degré moyen d'un nœud.* Aussi appelé nombre moyen de voisins d'un nœud. Il représente le nombre moyen, N_v , sur toute la durée de la simulation de nœuds voisins

connectés à chacun des nœuds :

$$N_v = \frac{1}{N_G} \sum_{t=1}^{N_G} \sum_{i=1}^{N(t)} \frac{1}{N(t)} v_i(t)$$

avec N_G le nombre de graphes de connectivité générés durant toute la simulation, il est égal à la durée totale de la simulation divisée par la durée de la période de mise à jour des graphes. $N(t)$ est le nombre de nœuds à la période t , $v_i(t)$ le nombre de voisins du nœud i à la période t .

- *Distribution des degrés moyens.* La répartition des véhicules dans les réseaux véhiculaires n'étant pas homogène, l'information sur le degré moyen des nœuds ne renseigne pas sur le degré de chaque véhicule, c'est une donnée globale qui caractérise la connectivité dans tout le réseau et non la connectivité particulière d'un nœud. Pour analyser plus en détail le degré par nœud dans le réseau, le module statistiques estime la distribution des nœuds par degré moyen. Pour ce faire, le module définit L intervalles successifs de degré moyen I_l ($1 \leq l \leq L$) tels que $I_1 = [0, d_1[$, $I_2 = [d_1, d_2[$, \dots , $I_L = [d_{L-1}, d_L[$ avec $d_L = N - 1$, N étant le nombre de véhicules simulés et $N - 1$ le nombre maximum de voisins que peut avoir un véhicule. A chaque période, le module calcule le degré, d , de chaque nœud, détermine l'intervalle I_l auquel appartient d et incrémente de 1 la variable DD_l qui représente le nombre de nœuds dont le degré appartient à l'intervalle I_l . Les valeurs retournées par le module sont les moyennes des DD_l ($1 \leq l \leq L$) calculées sur toutes les périodes.

- *Durée moyenne des liens.* Les durées des liens sont calculées à partir de tous les graphes de connectivité générés durant la simulation. Le module statistiques associe à chaque lien un *age* qui est initialisé à T , le pas de calcul en seconde, à l'apparition du lien. A chaque nouveau graphe généré, le module vérifie si le lien existe toujours, si tel est le cas, l'age du lien est incrémente de T ; dans le cas contraire, le lien est considéré comme interrompu et sa durée est positionnée à la valeur de *age*. La durée moyenne des liens est la moyenne des durées de tous les liens créés durant la simulation.

- *Distribution de la durée des liens.* De même que pour le degré moyen des liens, pour une analyse détaillée de la durée des liens, le module statistiques estime la distribution des liens par durée moyenne. Le module définit M intervalles successifs de durée moyenne I_m ($1 \leq m \leq M$) tels que $I_1 = [0, l_1[$, $I_2 = [l_1, l_2[$, \dots , $I_M = [l_{M-1}, l_M[$ avec l_M la durée totale de la simulation. A chaque période t , le module calcule la durée, l , de chaque lien interrompu, détermine l'intervalle I_j auquel appartient la valeur l puis incrémente de un la variable DL_j qui représente le nombre de liens dont la durée appartient à l'intervalle I_j . Les valeurs retournées par le module sont celles des DL_j ($1 \leq j \leq M$) calculées sur toute la durée de la simulation.

- *Partitionnement du réseau.* Le partitionnement du réseau signifie la formation de groupes isolés de nœuds dans le réseau. Chaque nœud d'un groupe peut communiquer

avec tout autre nœud du même groupe par le biais de communications à un saut ou multi-saut. Cependant, il ne peut communiquer avec aucun autre nœud des autres groupes. Les groupes de nœuds sont périodiquement déterminés par le module statistiques à partir du graphe de connectivité en considérant uniquement les liens symétriques. Chaque groupe correspond à un sous-graphe connexe du graphe de connectivité.

Selon les applications supportées par le réseau, deux types de communications peuvent être distingués dans les VANET ; les communications point-à-point (unicast) et les communications point-à-multipoint (multicast, broadcast). Les exigences en connectivité diffèrent selon le type de communication. Dans les communications point-à-point les données sont émises par un véhicule à destination d'un seul véhicule. La communication n'est possible que s'il existe une route, au sens radio, à un saut ou multi-saut entre les deux véhicules. Les communications point-à-point sont influencées par toutes les métriques précédemment définies. Le nombre de voisins et le partitionnement du réseau renseignent sur la possibilité ou non d'établir les communications multi-sauts. Lorsque le nombre de voisins est élevé, il est plus probable de trouver une route vers toutes les destinations. Dans le cas contraire, réseaux à faible connectivité, la formation de groupes isolés de nœuds rend impossibles les communications de bout en bout entre tout couple de nœuds appartenant chacun à des groupes différents. Plus le nombre de groupes est élevé, plus les communications de bout-en-bout deviennent impossibles. La durée des liens renseigne sur la fréquence de changement de la topologie du réseau. Dans les réseaux dynamiques, la durée des liens est très faible, les liens apparaissent et disparaissent rapidement rendant invalides les routes déjà établies entre des nœuds communicants. Ceci cause des pertes considérables de données.

Les communications multicast et broadcast dans les réseaux véhiculaires ne nécessitent pas, en général, de définir une route entre le nœud source et les nœuds destinataires. Les données transitent de proche en proche, chaque nœud diffusant le message, jusqu'à atteindre tous les nœuds destinataires. Les deux paramètres qui affectent ce type de communications sont le degré des nœuds et le partitionnement du réseau. Comme dans le cas des communications point-à-point, la formation de groupes isolés de nœuds empêche la propagation des données au delà du groupe contenant le nœud source de l'information diffusée. L'influence du degré des nœuds diffère selon que les degrés sont élevés ou faibles. Dans le cas d'une faible connectivité, donc de faibles degrés de nœuds, le problème qui se pose est similaire à celui des communications point-à-point, les données ne sont pas suffisamment propagées dans le réseau et peuvent ne pas arriver à tous les destinataires concernés. Dans le cas de forte connectivité, c'est le problème inverse qui se pose, l'inondation du réseau par des diffusions de proche en proche des données génère un trafic important qui surcharge le réseau, c'est le problème du broadcast storm.

Plusieurs mécanismes ont été développés pour palier les problèmes des communications

point-à-point et point-à-multipoint, nous les discutons dans le chapitre quatre qui traite le routage dans les VANET.

3.3.2 Analyse des résultats

L'environnement que nous avons considéré pour l'étude de la connectivité est la communauté d'agglomération Belfortaine (CAB). Le tableau 3.4 résume les valeurs des paramètres de simulation.

Paramètres		Valeurs
Environnement		Centre ville de Belfort $2500m \times 2500m$
Période de mise à jours (T)		1s
Mobilité	Modèles	V-MBMM
	V_{min}, V_{max}	30km/h, 50km/h
	Durée feux	45s
	Trajectoire	Pas-à-pas
	Population candidate à la mobilité	8000, 10000 mobiles
Tranche horaire		12h-14h
Propagation	Modèles	V-PROPAG, Two-Ray Ground
	Gain antenne	2dBi
	Hauteur antenne	1,5m
	Puissance émission	23dBm
	Sensibilité	-77dBm
	Frequence	5,9GHz
d_{max}		500m

TABLE 3.4 – Paramètres de simulation pour l'étude de la connectivité.

Selon les valeurs des paramètres de propagation spécifiées dans le tableau, le rayon de couverture avec Two-Ray Ground est d'environ 300m.

Pour prédire la couverture radio des véhicules dans un environnement donné, le module propagation radio prend en entrée la liste des mailles route de l'environnement pour limiter le calcul de la couverture radio uniquement aux routes. Le modèle V-PROPAG utilise la catégorie du terrain et l'altitude de toutes les mailles de l'environnement pour calculer le path loss. Pour appliquer le modèle V-PROPAG à la CAB, la première étape consiste à classer les mailles du territoire suivant les trois catégories de terrain définies dans le modèle ERCEG. Les bâtiments étant le principal type d'obstacles que peut rencontrer un signal qui se propage dans une ville, les données de la CAB utilisées pour la détermination des catégories de terrain sont le taux de structures (bâtiments, commerce, maison. . .) présentes sur chaque maille. Les mailles sont classifiées comme suit : toutes les mailles ayant plus de 66% de structures sont classifiées dans la catégorie A (forte densité d'obstacles), toutes

celles dont le pourcentage de structures est compris entre 33% et 66% appartiennent à la catégorie *B* (densité d'obstacles moyenne), toutes les autres mailles sont classifiées dans la catégorie *C* (faible densité d'obstacles). En plus des catégories de terrain, les données fournies sur l'altitude des mailles sont prises en compte dans le calcul de la hauteur des antennes et aussi pour déterminer si un obstacle physique existe entre deux véhicules. La figure 3.13 montre un exemple de zone de couverture de 200 véhicules se déplaçant dans le centre ville de Belfort calculées avec le modèle V-PROPAG. Chaque couleur représente la couverture radio depuis un véhicule, et l'atténuation de la couleur représente l'atténuation du signal jusqu'au seuil de $-77dBm$.



FIGURE 3.13 – Zones de couverture de 200 véhicules circulant au centre ville de Belfort.

La figure 3.14 montre un exemple de graphe de connectivité entre 200 véhicules se déplaçant dans le centre ville de Belfort. Le graphe est généré par le module graphes de connectivité.



FIGURE 3.14 – Graphe de connectivité entre 200 véhicules circulant dans le centre ville de Belfort.

Deux séries de tests ont été réalisées avec une population de 8000 et de 10000 véhicules candidats à la mobilité dans le centre ville de Belfort entre 12h et 14h. Les figures 3.15 à 3.17 montrent les valeurs des métriques de connectivités obtenues avec les deux modèles V-PROPAG et TRG.

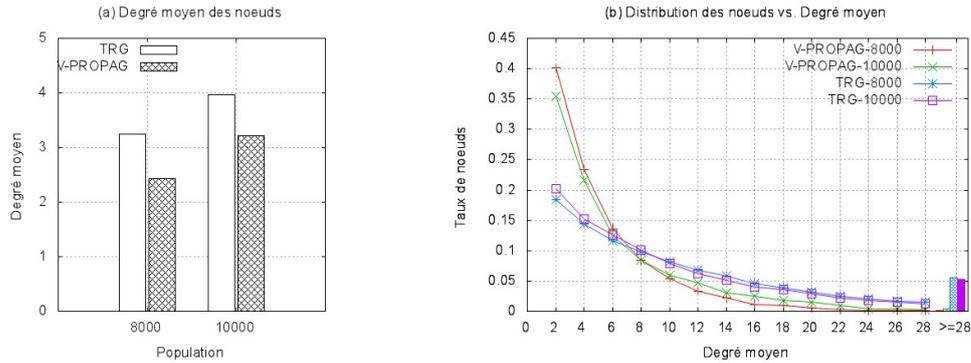


FIGURE 3.15 – Degré de connectivité des nœuds.

La figure 3.15.a montre que le degré moyen de connectivité augmente avec l'augmentation du nombre de mobiles ce qui est logique puisque chaque véhicule a plus de chance de rencontrer un autre véhicule qui rentre dans sa zone de couverture. En comparant les résultats obtenus avec TRG à ceux obtenus avec V-PROPAG, on constate que TRG suppose une meilleure connectivité puisqu'il ignore l'effet des obstacles et considère un espace plat et ouvert. La même observation peut également être faite pour la figure 3.15.b qui trace la distribution des nœuds vis-à-vis du nombre de voisins. Les valeurs des degrés sont divisées en 15 intervalles successifs I_i , $1 \leq i \leq 15$, tel que $I_i = [2(i-1), 2i[$, avec $1 \leq i \leq 14$ et le dernier intervalle I_{15} contient toutes les valeurs supérieures ou égales à 28. Pour les deux densités de mobiles, 8000 et 10000, TRG surestime très largement la connectivité des véhicules. Pour les faibles degrés de voisins, inférieur à 6, V-PROPAG présente les valeurs de taux les plus élevées signifiant qu'il y a plus de 75% des nœuds avec un degré inférieur à 6. A titre d'exemple, pour une population de 8000 mobiles, 40% des véhicules ont un degré inférieur à 2 contre moins de la moitié, 18%, avec le modèle TRG. Avec une population de 10000 les pourcentages sont respectivement de 35% et 20%. Les résultats s'inversent pour les degrés supérieurs à 6 indiquant que la connectivité est surestimée avec TRG.

De même que pour le degré des nœuds, les résultats sur la durée des liens obtenus avec TRG sont optimistes par rapport à ceux obtenus avec V-PROPAG. La figure 3.16.a montre que la durée moyenne des liens pour une population de 8000 est d'environ 100s avec TRG et de 58s avec V-PROPAG. Avec une population candidate de 10000 mobiles, le réseau est un peu plus stable et la durée moyenne des liens augmente à 118s avec TRG contre 60s

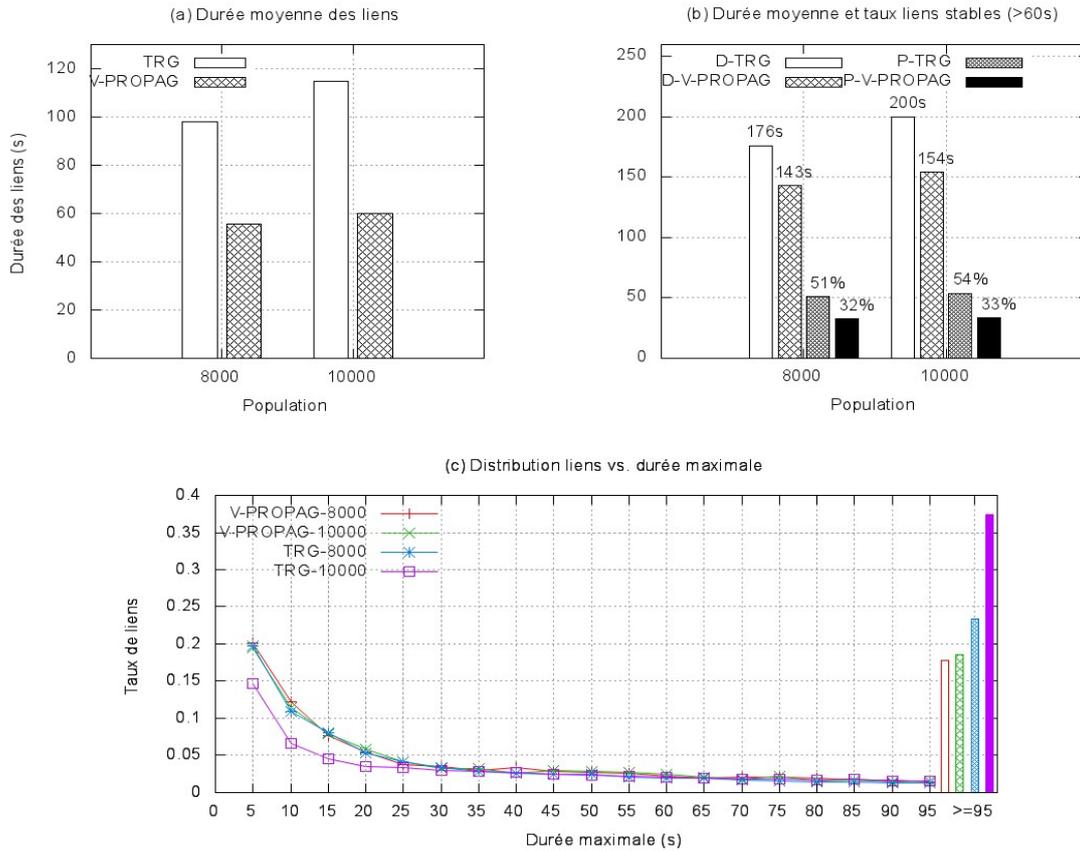


FIGURE 3.16 – Durée des liens radio entre nœuds.

avec V-PROPAG.

Dans les réseaux mobiles, la rupture des liens est causée soit par la mobilité des nœuds qui fait s'éloigner les mobiles communicants soit par les obstacles qui empêchent la propagation des signaux. Avec TRG, seul l'effet de la mobilité est pris en compte alors que V-PROPAG considère à la fois l'impact de la mobilité et celui des obstacles. Les valeurs obtenues avec TRG sont presque le double de celles obtenues avec V-PROPAG ce qui signifie que les obstacles ont un effet aussi important que celui de la mobilité et que cet effet doit être modélisé le plus fidèlement possible.

La figure 3.16.c montre la distribution de liens vis-à-vis de la durée maximale. 20 intervalles, I_i , $1 \leq i \leq 20$, de durées moyennes en secondes sont considérés tel que $I_i = [5(i-1), 5i[$ pour $1 \leq i \leq 19$ et le dernier intervalle I_{20} contient toutes les valeurs supérieures ou égales à 95s. Avec une population de 8000 mobiles et pour les faibles durées de liens, les taux trouvés avec V-PROPAG sont proches de ceux trouvés avec TRG, la différence est plus remarquable pour les durées supérieures à 95s. Avec V-PROPAG, 17% des liens ont une durée supérieure à 95s contre 23% avec TRG. Avec 10000 mobiles, le réseau est

un peu plus stable et la différence entre les deux modèles devient plus notable. Le taux de véhicules ayant une durée de liens inférieure à 35s est plus élevé dans V-PROPAG comparé à TRG. Pour des durées incluses entre 35s et 95s les taux trouvés avec les deux modèles sont quasiment les mêmes. Au delà de 95s, le taux de liens avec TRG est pratiquement le double de celui trouvé avec V-PROPAG. Ils sont respectivement de 37% et 18%.

Dans la figure 3.16.b nous avons uniquement considéré les liens les plus stables ; liens ayant une durée supérieure à 60s. Le graphe trace le pourcentage de ces liens (P-TRG, P-V-PROPAG) et leur durée moyenne (D-TRG, D-V-PROPAG). Les résultats montrent que lorsque les obstacles sont ignorés la qualité des liens est supposée meilleure. Avec une population de 8000 mobiles, 51% des liens ont une durée supérieure à 60s contre seulement 32% avec V-PROPAG. La durée moyenne de ces liens est de 176s avec TRG contre 143s dans V-PROPAG. Avec une population de 10000 mobiles, les pourcentages sont respectivement de 54% et 33% et les durées moyennes sont de 200s et 154s.

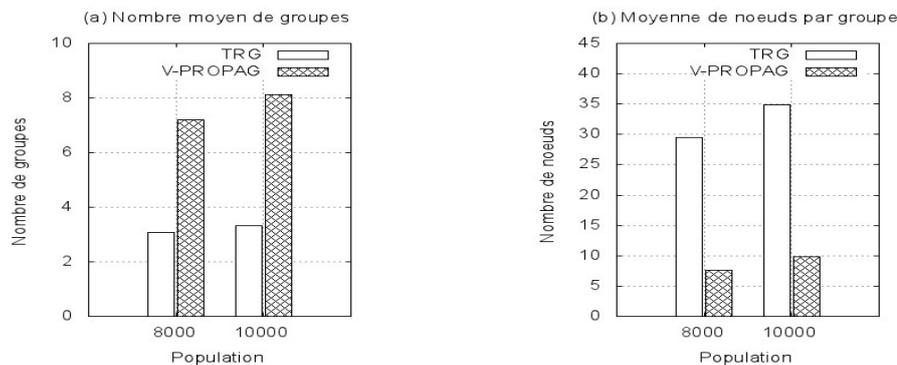


FIGURE 3.17 – Partitionnement du réseau en groupes d'au moins 2 nœuds.

La figure 3.17 montre les résultats sur le partitionnement du réseau en groupes isolés de nœuds. En supposant des rayons de couverture de 300m sur un espace de 2500m × 2500m, les graphes de connectivité générés avec le modèle TRG sont en général connexes. Avec le modèle V-PROPAG, la connectivité n'est pas uniquement affectée par la distance mais également par les obstacles présents dans l'environnement. Ces obstacles peuvent empêcher la communication entre nœuds physiquement proches d'où la formation de plus de groupes isolés de nœuds dans le réseau. Le graphe 3.17.a montre que le nombre moyen de groupes isolés avec V-PROPAG est plus du double du nombre trouvé avec TRG. Il est à noter que les nœuds isolés, c'est à dire n'ayant aucun lien radio avec d'autres nœuds, sont ignorés dans les calculs puisqu'ils ne font partie d'aucun groupe. Les deux graphes (a) et (b) de la figure 3.17 montrent qu'en moyenne, pour des graphes de connectivité générés chaque seconde pendant 2 heures de simulation, le nombre de nœuds qui appartiennent à des groupes³ dans le cas de TRG, est de 91 pour une population de 8000 mobiles et de 116

3. Le nombre de nœuds est égal au nombre de groupes multiplié par le nombre de nœuds par groupe

pour une population de 10000 mobiles. Avec le modèle V-PROPAG, les nombres de nœuds sont seulement de 55 et 79. Le nombre moyen de nœuds mobiles présents par période est de 100 pour une population de 80000 et de 130 pour une population de 10000.

L'un des aspects de la mobilité dans les réseaux véhiculaires est la variation des caractéristiques du trafic durant les périodes de la journée et les jours de la semaine. Cet aspect est modélisé dans le modèle V-MBMM en divisant la journée en plusieurs périodes représentatives du comportement journalier des individus et en associant à chacune son propre taux de mobilité et ensemble d'activités. Le nombre et la répartition des véhicules varient ainsi d'une période à l'autre.

Nous avons réalisé les derniers tests dans l'objectif de déterminer l'influence que peut avoir la variation du trafic sur les caractéristiques du réseau. Trois périodes ont été considérées : la pause déjeuner de 12h à 14h, la sortie du travail de 17h à 19h et les loisirs de 19h à 21h. La figure 3.18 montre les caractéristiques de la connectivité radio obtenues avec le modèle V-PROPAG sur ces trois périodes avec des populations de 8000 et 10000 mobiles. Les valeurs des paramètres de simulation sont celles présentées dans le tableau 3.4.

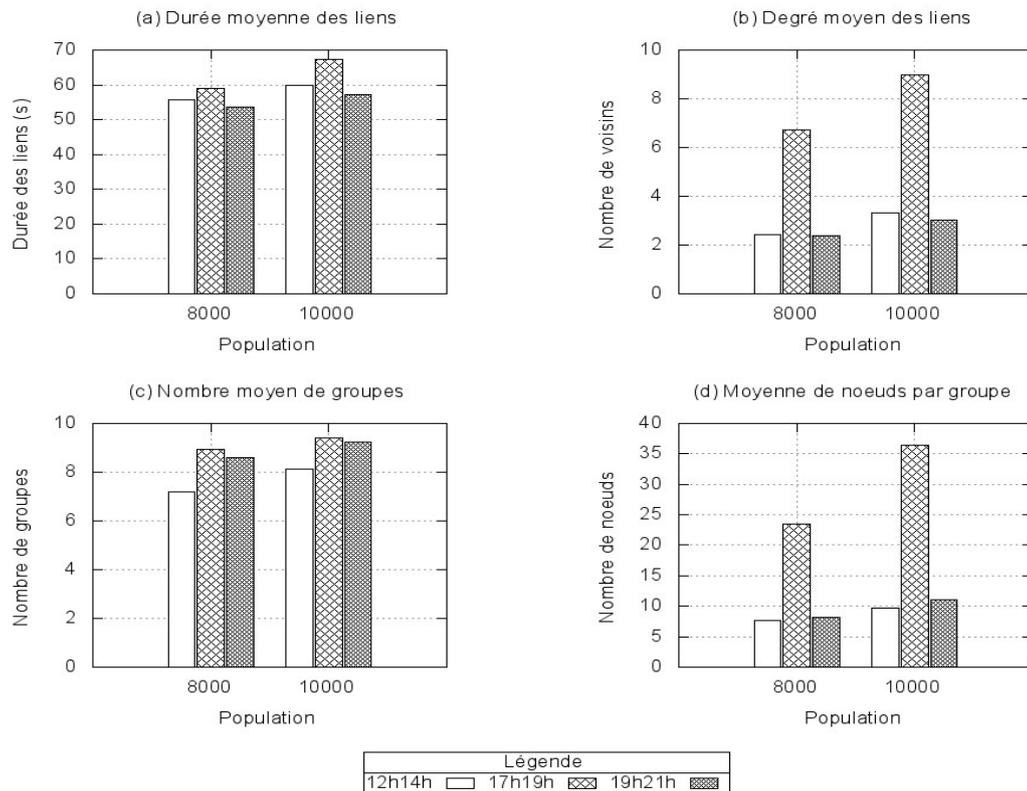


FIGURE 3.18 – Aspect temporel et connectivité radio - V-PROPAG.

arrondi à l'entier le plus proche.

Rappelons d'abord les caractéristiques du trafic sur les trois périodes en termes de densité de mobile et de répartition sur le territoire. Concernant le taux de mobilité, le nombre de véhicules qui se déplacent durant les périodes 17h-19h et 19h-21h est plus élevé que durant la période 12h-14h. La répartition du trafic est déterminée en fonction des activités des individus durant chaque période. De 17h à 19h, la principale activité étant la sortie du travail vers le domicile et les commerces, le trafic est plus concentré à proximité des lieux de travail. De même, de 12h à 14h, la plupart des individus ont la même activité, déplacement vers le lieu du déjeuner puis retour au travail, le trafic est donc plus dense à proximité des commerces et des lieux de travail. Durant ces deux périodes la répartition du trafic n'est pas uniforme mais plutôt dense dans certaines régions et faible dans d'autres. Entre 19h et 21h les activités sont un peu plus diverses, sortie du travail, départ aux commerces, loisirs et autre, les mobiles ne sont pas concentrés dans la même région et sont répartis sur toute la ville.

Les résultats de la figure 3.18 montrent que le réseau est plus stable entre 17h et 19h. La raison étant que le nombre de mobiles et la densité du trafic par région sont élevés durant cette période, ce qui diminue les discontinuités dans le réseau. Les durées de liens et les degrés de nœuds sont plus élevés comparés aux périodes 12h-14h et 19h-21h qui présentent pratiquement les mêmes valeurs. Concernant le partitionnement du réseau en groupes isolés de nœuds, les résultats montrent qu'il y a beaucoup de groupes de faible connectivité durant la période 19h-21h. La raison étant que les mobiles sont répartis sur l'ensemble de l'espace de simulation formant plusieurs petits groupes isolés de nœuds. Le partitionnement du réseau est également important entre 12h et 14h mais la cause ici est liée au plus faible nombre de nœuds dans le réseau. Le nombre moyen de véhicules présents par tranche de 1s est de 100 pour une population de 80000 et de 130 pour une population de 10000. Les nombres moyens de nœuds isolés pour les deux populations sont respectivement de 45 et 51. Entre 17h et 19h, le réseau est partitionné en peu de groupes de grandes tailles. Ceci est dû au nombre élevé de véhicules et à leur forte densité par région qui favorisent la formation de groupes.

Afin de démontrer l'impact du choix du modèle de propagation sur les caractéristiques du réseau, la figure 3.19 présente les mêmes résultats que la figure 3.18 obtenus avec le modèle TRG. D'une manière générale, on peut constater que quelque soit la période les résultats obtenus avec TRG sont très optimistes. La durée des liens est pratiquement doublée, le nombre de groupes est divisé par trois et le nombre de nœuds par groupe est quatre à cinq fois plus important.

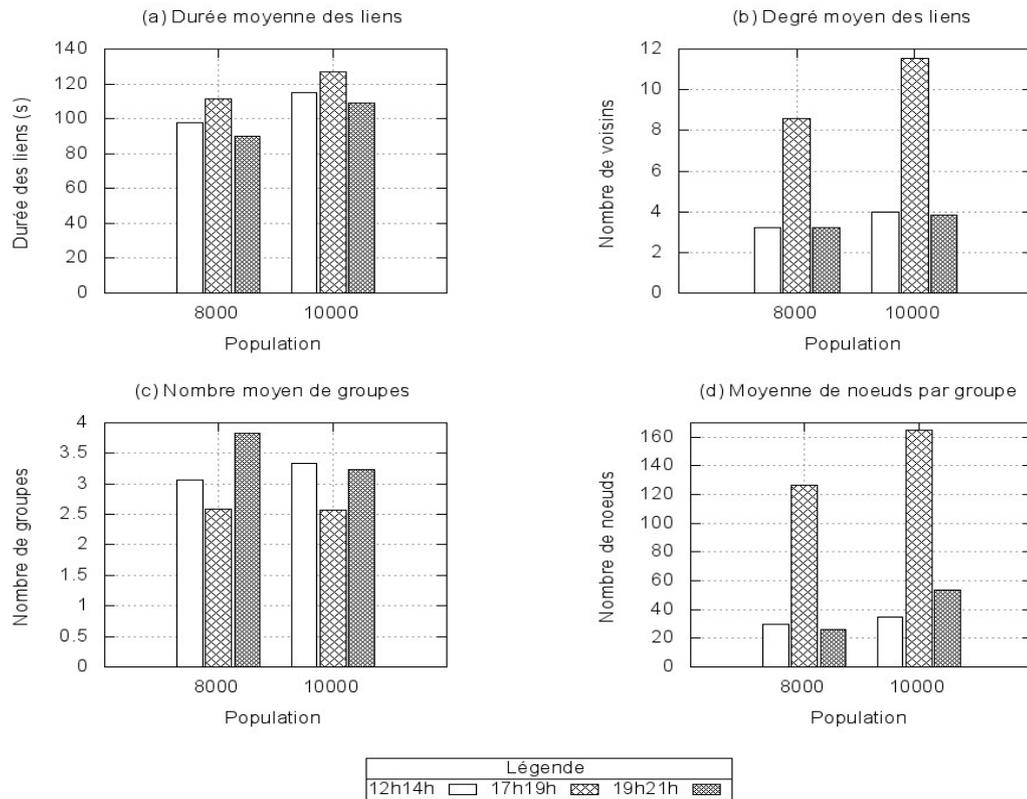


FIGURE 3.19 – Aspect temporel et connectivité radio - TRG.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des propriétés des VANET du point de vue de la connectivité radio. Pour aboutir à des conclusions valides, notre premier objectif était le développement d'un modèle de propagation radio réaliste qui reproduit le plus fidèlement possible l'effet des obstacles de l'environnement sur la qualité des signaux. Nous avons défini un nouveau modèle, V-PROPAG, qui contrairement aux modèles existants ne se base pas sur une classification globale de l'environnement en l'un des quatre types, urbain, suburbain, rural ou autoroutier. Il utilise plutôt des informations plus précises sur les caractéristiques du terrain pour prédire le path loss. L'impact des obstacles est pris en compte dans le modèle V-PROPAG en maillant le territoire à une échelle de 25m x 25m et en classifiant le milieu de propagation des signaux, pour chaque maille, en l'une des trois catégories du modèle ERCEG, *A* pour les terrains à forte densité d'obstacles, *B* pour les terrains à moyenne densité d'obstacles et *C* pour les terrains à faible densité d'obstacles. Ces trois catégories sont différenciées dans le modèle en associant à chacune ses propres valeurs d'exposant path loss et de shadowing. Par ailleurs, le modèle tient compte de la hauteur du sursol et des hauteurs relatives de l'émetteur et du récepteur.

Les tests réalisés en considérant la CAB comme environnement de simulation ont montré l'impact que représente le choix du modèle de propagation radio sur la connectivité dans le réseau. Pour l'ensemble des paramètres étudiés, les résultats obtenus avec le modèle Two-Ray Ground sont très optimistes. En ignorant les obstacles de l'environnement, seule la mobilité des nœuds cause la variation de la topologie du réseau, la qualité des connexions radio est au minimum deux fois meilleure que ce que l'on obtient avec une modélisation plus précise. Ces résultats rendent très optimistes les hypothèses sur le fonctionnement réel des réseaux.

Pour analyser les propriétés des VANET, une architecture à quatre modules a été développée. Le premier module permet la simulation de la mobilité des véhicules via le modèle V-MBMM, le second module permet la prédiction de la couverture radio des véhicules avec le modèle V-PROPAG ou TRG, le troisième module utilise les résultats des deux premiers modules pour construire les graphes de connectivité et le dernier module enregistre les statistiques sur les propriétés de la topologie du réseau en se basant sur les graphes de connectivité.

A l'issue des résultats obtenus nous pouvons conclure que :

- La connectivité radio dans les VANET n'est pas uniforme mais varie dans l'espace et le temps. Les caractéristiques du réseau diffèrent à tout instant d'une région à l'autre, et dans une même région d'une période à l'autre.
- La connectivité radio dans les VANET est intermittente et extrêmement instable ; dans les cas que nous avons étudiés, plus de 20% des liens ont une durée inférieure à 5s.
- La densité des nœuds est variable, elle dépend de la localisation des nœuds et de la période simulée. Elle est forte aux heures de pointe dans les zones attractives, plus de 8 voisins par nœud, et faible durant les heures creuses notamment dans les zones à faible attractivité.
- Le problème du partitionnement du réseau se pose dans tous les scénarios. Les véhicules ont tendance à se déplacer en groupes isolés, le nombre de groupes diffère d'une période à l'autre et leur taille change d'une zone à l'autre. Plus de 40% des nœuds sont totalement isolés dans les périodes à moyenne densité du trafic.

Dans le prochain chapitre, nous allons analyser les performances des protocoles de routage les plus répandus dans la littérature dans le cadre des VANET. Nous montrons qu'en ignorant les caractéristiques de la topologie du réseau certains protocoles enregistrent de très faibles performances.

Chapitre 4

Protocoles et mécanismes de routage dans les VANET

L'analyse de la connectivité radio présentée dans le chapitre précédent a montré que les VANET ont des caractéristiques particulières qui rendent difficile, voire impossible, dans certains cas, la détermination de routes stables entre les sources et les destinations des données. Pour garantir son efficacité, un protocole de routage doit intégrer les mécanismes nécessaires pour faire face aux problèmes de connectivité intermittente, du partitionnement du réseau et du broadcast storm qui caractérisent les VANET. Dans ce chapitre, nous analysons les performances des protocoles de routage les plus répandus dans la littérature dans le cadre des VANET. Notre étude enrichit les travaux déjà réalisés dans ce contexte sur deux plans. D'une part, en plus d'analyser et de comparer les résultats obtenus avec chaque protocole, nous examinons dans le détail les mécanismes de fonctionnement et d'implémentation utilisés par chacun d'eux. L'objectif est d'identifier les mécanismes les mieux adaptés aux VANET et ceux qui causent la dégradation des performances. D'autre part, pour aboutir à des conclusions valides, nous basons notre étude sur des modèles de propagation radio et de mobilité plus précis que ceux utilisés dans la plupart des études.

Ce travail a fait l'objet d'une publication lors de la conférence : *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*.

Sommaire

4.1	Routage dans les VANET	130
4.2	Architecture générale du système	134
4.3	Simulations et résultats	140
4.4	Dissémination d'informations sur un service d'alerte	152
4.5	Conclusion	154

4.1 Routage dans les VANET

Le routage joue un rôle très important dans les VANET puisque tous les services supportés, unicast ou multicast, se basent sur des communications multi-saut pour l'acheminement des données. Les communications unicast sont généralement utilisées dans les applications de confort telles que le transfert de fichiers et les jeux. Les communications multicast sont utilisées dans les applications de sécurité et de gestion de trafic telles que l'avertissement de collision et le platooning. Pour réaliser les échanges, les protocoles de routage utilisent des informations locales, sur le voisinage immédiat, ou globales, concernant tout le réseau, afin de déterminer les nœuds relais qui participent à l'acheminement des données. Les informations sont obtenues par des échanges de paquets de contrôle entre nœuds. La fréquence des échanges et les informations spécifiées dans les paquets diffèrent d'un protocole à l'autre tout comme les mécanismes utilisés pour déterminer les nœuds relais.

Dans notre étude, on s'intéresse exclusivement au routage unicast car le besoin en ressources est plus critique pour faire aboutir les communications. Deux grandes classes de protocoles de routage unicast peuvent être distinguées selon le type d'informations utilisées pour acheminer les données. La première classe est celle des protocoles qui se basent sur des informations sur la topologie du réseau, se sont les protocoles du groupe MANET¹. La seconde classe est celle des nouveaux protocoles dits géographiques ou de position qui se basent sur des informations supplémentaires sur la position géographique et dans certains protocoles sur la vitesse et l'itinéraire des nœuds pour la sélection des nœuds relais.

Les protocoles de routage basés sur la topologie sont généralement classés en protocoles proactifs et protocoles réactifs. Dans les protocoles proactifs, chaque nœud garde une image de la topologie de tout le réseau. Cette image est mise à jour, périodiquement ou à chaque modification topologique, par un échange de messages de contrôle. Les routes sont déterminées sur la base de cette image. Pour diminuer le surcoût imposé par l'échange périodique de messages de contrôle, les protocoles réactifs n'établissent les routes qu'à la demande. Un nœud qui désire envoyer des données lance une procédure de découverte de route en diffusant un paquet de contrôle dans le réseau à la recherche d'une route vers le destinataire. Parmi les protocoles les plus répandus, OLSR [Clausen & Jacquet, 2003] qui est un protocole proactif et AODV [Perkins *et al.*, 2003] et DSR [Johnson *et al.*, 2003] qui appartiennent à la classe des protocoles réactifs.

1. <http://datatracker.ietf.org/wg/manet/charter/>

Les protocoles de routage géographique se basent sur d'autres hypothèses qui sont :

- Chaque nœud peut déterminer sa position physique via un système de positionnement tel que le GPS, ou en utilisant un système de coordonnées basé sur les caractéristiques des signaux en entrée des nœuds.
- Chaque nœud garde les informations de position de tous ses voisins directs (voisins à un saut) et ces informations sont en général maintenues par un broadcast périodique de beacons qui spécifient l'identité et la position du nœud émetteur.
- L'existence d'un service de localisation qui maintient l'information de position de tous les nœuds du réseau. Ce service est utilisé par un nœud source pour obtenir la position de son destinataire. Cette position est ajoutée à l'entête de tout paquet envoyé par la source. GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [Karp & Kung, 2000], LAR (*Location-Aided Routing*) [Ko & Vaidya, 2000] et DREAM (*Distance Routing Effect Algorithm for. Mobility*) [Basagni *et al.*, 1998] sont quelques-uns des protocoles géographiques les plus largement étudiés.

L'absence de toute infrastructure ajoutée aux changements dynamiques de la topologie rendent difficile la tâche de routage dans les VANET. Les principaux problèmes auxquels doivent faire face les protocoles de routage incluent :

- La forte mobilité des nœuds : les changements très fréquents de topologie rendent le plus souvent les informations maintenues au niveau des nœuds non valides (positions des voisins directs dans le cas des protocoles géographiques et informations sur la topologie du réseau dans le cas des protocoles basés sur la topologie).
- La forte densité des nœuds : les échanges périodiques des messages de contrôle entre voisins directs et les diffusions de proche en proche des paquets de données ou de contrôle peuvent engendrer un trafic important dans le cas de réseaux à forte densité (scénario fréquent dans les réseaux de véhicules : centre ville, bouchon dans une autoroute, etc.).
- Le partitionnement du réseau : les protocoles de routage, notamment ceux basés sur la topologie, supposent des réseaux fortement connectés où il existe toujours une route entre les nœuds du réseau. Lorsque le problème du partitionnement du réseau n'est pas pris en compte, la formation de groupes isolés de nœuds empêche la propagation des données dans le réseau et pénalise les communications de bout en bout.

Dans ce chapitre sont analysés les trois protocoles basés sur la topologie les plus répandus et les plus considérés dans les travaux de recherche sur les VANET à savoir, AODV, DSR et OLSR. Nous n'étudions pas les protocoles basés sur les positions car nous travaillons dans l'hypothèse la plus générale sans support d'un système externe de localisation.

4.1.1 AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) [Perkins *et al.*, 2003]

La plupart des travaux de recherche sur les réseaux mobiles ad hoc considèrent le protocole de routage AODV qui est un protocole réactif à vecteur de distance. Dans ce type de protocole, les nœuds ne maintiennent que les informations sur leur voisinage direct qu'ils utilisent pour déterminer les routes, de proche en proche, en fonction de la distance. La distance correspond au nombre de nœuds relais (nombre de sauts) qui appartiennent à la route entre la source et la destination. En tant que protocole réactif, AODV n'utilise pas d'échanges périodiques d'informations sur la topologie du réseau, seules les routes des communications actives sont maintenues dans les tables de routage des nœuds. Chaque entrée de la table correspond à une destination et contient plusieurs champs dont essentiellement, l'identificateur du destinataire, l'identificateur du nœud suivant utilisé comme relai pour atteindre le destinataire, le numéro de la séquence pour atteindre le destinataire et le temps d'expiration de l'entrée. Les numéros de séquence sont utilisés pour maintenir la consistance des informations de routage. Les informations contenues dans les tables de routage sont obtenues et mises à jours à partir des données contenues dans les paquets de contrôle essentiellement les paquets RREQ (route request) et les paquets RREP (route reply).

Lorsqu'un nœud source désire envoyer des données vers un destinataire, il vérifie tout d'abord si une route valide vers ce destinataire existe dans sa table de routage. Si la route n'est pas trouvée, le nœud source lance la procédure de découverte de route en diffusant en broadcast un paquet RREQ à la recherche d'un chemin vers le destinataire. Seule la première copie de RREQ est traitée par chaque nœud qui la reçoit. A la réception de la requête, le nœud répond par un paquet RREP s'il est le destinataire ou s'il possède une route vers la destination avec un numéro de séquence supérieur ou égal à celui indiqué dans le paquet RREQ ; un numéro supérieur indique qu'une route plus récente existe. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si la table de routage ne contient pas de route vers le destinataire, le nœud rediffuse le RREQ. Si le nœud source ne reçoit pas de réponse au bout d'un certain délai d'attente, il rediffuse un nouveau paquet RREQ et attend une durée supérieure à la première. Si aucune réponse n'est reçue au bout de trois tentatives, le nœud source abandonne le processus de recherche de route qu'il ne relance qu'après un certain délai. Une fois la route trouvée, les paquets de données transmis par le nœud source transitent de proche en proche et chaque nœud détermine le prochain relai à partir de sa table de routage. En cas de rupture de route, le nœud intermédiaire informe la source en lui envoyant un paquet indiquant l'erreur, il peut également tenter de réparer la route afin de minimiser le taux de perte des données.

4.1.2 DSR (Dynamic Source Routing) [Johnson *et al.*, 2003]

DSR fonctionne de la même manière que AODV ; c'est un protocole réactif qui n'utilise aucun échange périodique d'informations de contrôle, seules les routes actives sont maintenues dans les tables de routage. La différence entre les deux protocoles réside dans le fait que, dans AODV la route est déterminée de proche en proche, alors que DSR utilise la technique de routage par la source. Dans cette technique, le nœud source détermine la suite complète de nœuds à traverser qu'il insère dans chaque paquet de données avant sa transmission. Cette séquence est utilisée par chaque nœud de la route pour déterminer le prochain relai vers le destinataire.

De même que AODV, lorsqu'un nœud source désire envoyer des données vers une destination pour laquelle il ne possède pas de route, il initie une procédure de découverte de route en diffusant un paquet RREQ. Un nœud qui reçoit le RREQ répond par un RREP s'il est le destinataire ou s'il contient dans sa table une route vers le destinataire. Dans le cas contraire, le nœud insère son identifiant dans l'entête du RREQ qu'il rediffuse. Un nœud qui répond à une requête de route indique la liste des nœuds entre la source et la destination dans l'entête du paquet RREP. Cette liste est soit directement extraite du RREQ si l'émetteur du RREP est le destinataire ou déduite à partir de la table de routage et de l'entête du RREQ si la réponse est émise par un nœud intermédiaire. En cas d'échec de réception d'un RREP, le nœud source utilise la même procédure que dans AODV, il retransmet à chaque échec un nouveau paquet RREQ ; si aucune réponse n'est reçue au bout d'un certain nombre de tentatives, le nœud abandonne le processus de découverte de route qu'il ne relance qu'au bout d'un certain délai.

Contrairement à AODV, chaque nœud peut garder plusieurs routes vers une destination, une route principale et des routes secondaires qui sont utilisées dans le cas de rupture de la route principale. La rupture de route peut être détectée par la source ou par un nœud intermédiaire qui envoie un message d'erreur de route à la source. Le nœud intermédiaire peut également tenter de retransmettre les données s'il connaît une route vers le destinataire autre que celle indiquée dans le paquet de données.

4.1.3 OLSR (Optimized Link State Routing) [Clausen & Jacquet, 2003]

Les protocoles proactifs se basent sur un échange régulier de paquets de contrôle pour le maintien, au niveau de chaque nœud, d'informations sur la topologie entière du réseau. L'inconvénient majeur de ces protocoles est l'inondation du réseau par l'échange périodique

de messages de contrôle.

OLSR est un protocole proactif proposé par l'équipe projet HIPERCOM-INRIA. Comme son nom l'indique, c'est un protocole à état de liens qui, pour limiter la diffusion de messages de contrôle dans le réseau, utilise un mécanisme d'inondation optimisé selon lequel seul un sous ensemble de nœuds du réseau, les relais multipoints MPR (*MultiPoint Relays*), sont autorisés à diffuser les informations sur la topologie du réseau.

OLSR utilise deux types de message de contrôle, HELLO et TC (*Topology Control*). Chaque nœud diffuse périodiquement un message HELLO contenant la liste de ses voisins directs, l'état et le type des liens avec ces voisins et la liste de ses nœuds MPR. Les messages HELLO ne sont pas relayés et sont utilisés pour la détection des voisins à un et à deux sauts et pour le calcul des MPR. Les MPR d'un nœud correspondent à un sous ensemble de ses voisins à un saut choisis de sorte à couvrir tout son voisinage à deux sauts. Les messages HELLO permettent ainsi à chaque nœud de déterminer l'ensemble de ses nœuds MPR et pour chaque MPR de maintenir la liste des nœuds sélecteurs l'ayant choisi comme relai multipoints.

Les TC sont diffusés périodiquement dans tout le réseau pour permettre aux nœuds d'obtenir et de mettre à jour l'image de la topologie entière du réseau. Ces messages sont diffusés à une fréquence inférieure à celle des messages HELLO. Afin de minimiser les retransmissions des messages TC, seuls les nœuds MPR ont pour charge de générer et relayer les paquets TC. La procédure utilisée pour l'élection des MPR garantit que tous les nœuds du réseau reçoivent les paquets TC sauf à défaut de liaison radio. Chaque MPR spécifie dans le message TC qu'il génère la liste de ses voisins sélecteurs qui l'ont choisi comme relai multipoints et l'état des liens avec ses voisins. Les informations contenues dans les paquets TC sont utilisées par tous les nœuds pour la construction des tables de routage. Pour l'envoi et l'acheminement des données, les nœuds favorisent les routes avec le nombre de sauts minimum.

4.2 Architecture générale du système

4.2.1 Contexte de l'étude

L'analyse des performances des protocoles de routage dans les VANET a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Certains travaux [Jaap *et al.*, 2005], [Marinoni & Kari, 2006], [Härri *et al.*, 2006] et [Dar *et al.*, 2009] s'intéressent à l'étude de l'impact d'une modélisation réaliste sur les performances des protocoles et d'autres [Lochert *et al.*, 2003], [Naumov *et al.*, 2006], [Ramakrishnan *et al.*, 2011] ont pour objectif de proposer de nouvelles approches pour améliorer le rendement des protocoles.

Les auteurs de [Jaap *et al.*, 2005], [Marinoni & Kari, 2006], [Härri *et al.*, 2006] et [Ramakrishnan *et al.*, 2011] ont étudié les performances des protocoles basés sur la topologie dans le cadre des VANET. Les modèles de mobilité et de propagation radio considérés dans [Jaap *et al.*, 2005] et [Marinoni & Kari, 2006] sont très simples et manquent de réalismes. Dans les deux travaux, les véhicules sont supposés se déplacer sur une route de type grille de Manhattan. Leurs positions, itinéraires et vitesses sont déterminés de manière aléatoire. Les zones de couverture sont représentées par un cercle parfait autour de chaque véhicule. Dans [Marinoni & Kari, 2006], l'effet des obstacles est simplement modélisé en considérant que le signal ne se propage pas si un obstacle est situé près du véhicule émetteur. Le modèle de mobilité utilisé dans [Härri *et al.*, 2006] est VanetMobiSim et la topologie des routes est représentée par un diagramme de Voronoï. L'insuffisance de ce travail est liée au modèle de propagation utilisé qui simule la zone de couverture de chaque nœud par un cercle. Ramakrishnan *et al.* [Ramakrishnan *et al.*, 2011] ont analysé les performances de AODV, DSR et DSDV en autoroute. De même que pour [Härri *et al.*, 2006], les zones de couverture sont représentées par de simples cercles autour de chaque véhicule.

Dans [Dar *et al.*, 2009], les auteurs ont présenté une étude comparative des performances des protocoles de routage géographiques les plus répandus en environnement urbain. Les mouvements des véhicules sont générés par le modèle de mobilité MOVE. Les résultats présentent la même insuffisance que [Härri *et al.*, 2006] et [Ramakrishnan *et al.*, 2011] pour la simulation des liens radio. Dans [Lochert *et al.*, 2003] et [Naumov *et al.*, 2006], les auteurs ont comparé les protocoles géographiques aux protocoles basés sur la topologie. Les modèles de mobilité utilisés dans les deux travaux sont réalistes, cependant, la propagation radio est modélisée dans [Lochert *et al.*, 2003] par une approche similaire à [Marinoni & Kari, 2006] et dans [Naumov *et al.*, 2006] par le modèle du shadowing. De manière générale, la modélisation des liens radio est simplifiée et fausse l'analyse des performances. De la même façon, la volatilité de ces liens n'est pas suffisamment prise en compte dans le contexte du routage. Le tableau 4.2 résume les principaux paramètres de simulation considérés dans ces travaux.

La validité des résultats de toute étude basée sur les simulations est directement liée au niveau du réalisme des modèles utilisés. Dans le cadre des VANET, trois parties sont essentielles : la modélisation des protocoles réseaux, la modélisation de la mobilité des nœuds et la modélisation de la propagation radio. D'un point de vue protocoles réseaux, il s'agit de définir les modèles qui reproduisent, aussi bien sur le plan matériel que logiciel, les mécanismes et fonctionnalités utilisés dans les couches protocolaires. La modélisation réaliste de la mobilité des nœuds et de la propagation radio consiste à définir les modèles qui reproduisent le plus fidèlement possible l'impact des paramètres de l'environnement sur le comportement des véhicules et la propagation des signaux. Dans ce chapitre, nous

	Protocoles analysés	Simulateur réseau	Mobilité	Propagation radio
[Jaap <i>et al.</i> , 2005]	AODV, DSR, FSR, TORA	ns-2	Manhattan & IDM	Cercle parfait
[Marinoni & Kari, 2006]	DSR	ns-2	Manhattan	Cercle parfait si obstacle pas de signal
[Härri <i>et al.</i> , 2006]	AODV, OLSR	ns-2	Voronoi & VanetMobiSim	Cercle parfait
[Ramakrishnan <i>et al.</i> , 2011]	AODV, DSR, DSDV	ns-2	Mobilité en autoroute	Cercle parfait
[Dar <i>et al.</i> , 2009]	DREAM, LAR, GPSR	ns-2	MOVE & traNs	Cercle parfait
[Lochert <i>et al.</i> , 2003]	AODV, DSR, GSR	ns-2	[Lochert <i>et al.</i> , 2003]	Cercle parfait si obstacle pas de signal
[Naumov <i>et al.</i> , 2006]	AODV, GPSR	ns-2	MMTS	Shadowing

TABLE 4.1 – Récapitulatif des travaux sur les performances du routage dans les VANET.

utilisons les modèles de mobilité et de propagation radio définis aux chapitres précédents pour évaluer la performance des protocoles dans des contextes très dynamiques et volatiles.

4.2.2 Simulation du réseau

Le simulateur réseaux utilisé dans l'étude présentée dans ce chapitre est le logiciel libre **ns-2** (*Network Simulator*). Le choix de ns-2 est justifié par le fait que c'est l'un des simulateurs réseaux les plus complets qui intègre les principaux mécanismes des communications sans fil dont plusieurs protocoles de routage. De plus, son approche modulaire facilite l'ajout de nouveaux modèles. Il s'agit d'ailleurs du simulateur réseau le plus largement utilisé dans les travaux de recherche à la fois sur les MANET et les VANET.

ns-2 est un simulateur à événements discrets écrit en C++ qui utilise OTcl comme interface de commande et de configuration. Il a été initialement développé par le groupe de recherche du projet VINT à l'Université de Californie à Berkeley pour la recherche dans les réseaux câblés et permettait la simulation du protocole TCP, du routage et des protocoles multicast sur les réseaux câblés. Le simulateur a été étendu par le groupe de recherche Monarch à Carnegie Mellon University² pour la simulation des réseaux sans fil en incluant, la mobilité des nœuds, une couche physique avec des modèles de propagation

2. <http://www.monarch.cs.rice.edu/>

des ondes radio, les interfaces radio et le mécanisme d'accès au canal DCF (*Distributed Coordination Function*) de la norme MAC IEEE 802.11.

Dans la simulation des protocoles de routage, trois niveaux interviennent : le niveau réseau qui implémente les algorithmes de routage, le niveau MAC où sont définis les mécanismes d'accès au canal et le niveau PHY qui implémente les procédures de réception et transmission des signaux et les différentes techniques de codage et de modulation. Dans [Chen *et al.*, 2007], les auteurs se sont intéressés à la modélisation des modules PHY et MAC dans ns-2 et ont soulevé certaines insuffisances importantes à la fois dans leur architecture globale et dans les détails de leur modélisation. Ils ont proposé une architecture et conception totalement nouvelle et plus réaliste des deux modules. Les modèles PHY et MAC proposés par les auteurs sont génériques et intègrent plusieurs fonctionnalités permettant la simulation de n'importe quel système de transmission de trame sur un seul canal. Les principales fonctions intégrées aux modules incluent, le calcul et la prise en compte du SNIR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*), le traitement et la capture du préambule et de l'entête physique PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*), la capture des trames MAC, le support de multiples schémas de modulation, etc. Deux équipes de recherche et développement de Mercedes-Benz en Amérique du Nord et de l'Université de Karlsruhe ont collaboré pour développer ces deux nouveaux modules qui ont été intégrés à partir de la version 33 de ns-2. La version 34 de ns-2 intègre également les spécificités de la norme IEEE 802.11p.

Une autre insuffisance de ns-2 concerne le manque de réalisme dans la modélisation de la mobilité des nœuds et de celle de la propagation des signaux radio. Il existe deux méthodes pour simuler la mobilité sous ns-2. La première consiste à utiliser des traces de mobilité qui décrivent les déplacements des nœuds. Les traces ont un format précis qui spécifie la position initiale des nœuds et pour chaque déplacement d'un nœud, l'instant de déplacement, le point destination vers lequel le nœud doit se déplacer et la vitesse de déplacement. Dans la seconde méthode les déplacements des nœuds sont générés de manière aléatoire par le simulateur. Chaque nœud peut se déplacer en ligne droite d'un point origine vers une destination aléatoire choisie avec une vitesse aléatoire. Arrivé à destination, le nœud peut marquer une pause ou répéter le processus en choisissant une nouvelle destination et une nouvelle vitesse. Il est bien évident que ns-2 ne peut être utilisé pour la simulation de la mobilité des véhicules. Les schémas de mobilité générés par le simulateur sont irréalistes et ignorent tous les paramètres qui régissent la mobilité des nœuds dans les VANET.

Les modèles de propagation radio implémentés sous ns-2 sont le modèle Free Space qui suppose un seul chemin de propagation direct entre les nœuds communicants, le modèle Two-Ray Ground qui ajoute au chemin direct un autre chemin réfléchi sur le sol, le modèle

Shadowing qui ajoute une composante aléatoire à la perte du signal pour modéliser l'influence de l'environnement sur le signal, les modèles de fading Ricean et Rayleigh qui tiennent compte de la propagation à trajets multiples et, le modèle Nakagami qui est un modèle mathématique configurable qui permet de simuler plusieurs types d'environnements.

L'ensemble de ces modèles manquent de réalisme, Free Space et Two-Ray Ground supposent un environnement plat non obstrué et modélisent les zones de couverture par des cercles parfaits. Bien que les modèles Shadowing, Ricean, Rayleigh et Nakagami intègrent les obstacles dans la modélisation de la propagation des signaux, ils restent néanmoins imprécis car ils ne tiennent pas compte des caractéristiques particulières de chaque environnement. L'affaiblissement que subissent les signaux peut être paramétré dans chaque modèle en fonction du milieu considéré, urbain, suburbain ou rural, mais les modèles présentent un comportement unique pour chacun de ces trois types. Ceci n'est pas correct étant donné que la densité et la nature des obstacles peut varier d'un milieu à l'autre, qu'il s'agisse d'un environnement urbain, suburbain ou rural, et dans un même milieu, d'un endroit à l'autre de la zone d'étude.

Dans le but d'avoir des résultats plus fiables, nous avons utilisé les modèles d'étude V-MBMM pour la simulation de la mobilité des nœuds et V-PROPAG pour la simulation de la propagation des ondes radio. Ces deux modèles ont été intégrés à la version ns-2.34 du simulateur ns-2 pour constituer un simulateur de VANET complet. L'architecture de ce simulateur est montrée en figure 4.1.

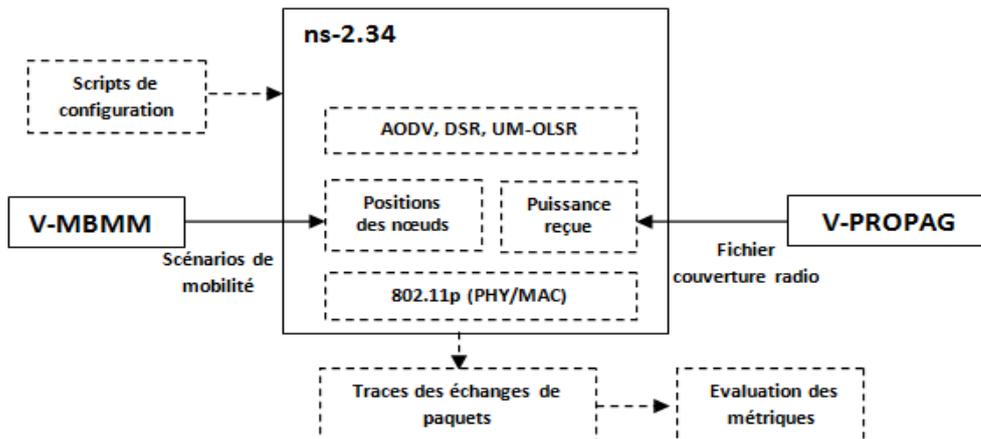


FIGURE 4.1 – Composantes du simulateur VANET.

Le code du **modèle V-MBMM** a été étendu pour générer des traces de mobilité compatible avec ns-2. Les traces sont pré-calculées et utilisées comme données d'entrée de ns-2 pour déterminer la position et les mouvements des nœuds. Un exemple du format des traces est donné ci-dessous. Les lignes de 1 à 3 indiquent les positions en 3D du nœud 0 et

les lignes de 4 à 6 celles du nœud 1. Les deux dernières lignes sont des commandes données à ns-2 lui demandant respectivement, de déplacer à l'instant 2 le nœud 0 vers le point de coordonnées (1160, 414) avec une vitesse de 8,246211m/s, et à l'instant 5 le nœud 1 vers le point (878, 928) avec la vitesse 1m/s.

1	\$node_(0) set X_ 1162
2	\$node_(0) set Y_ 406
3	\$node_(0) set Z_ 0.0000
4	\$node_(1) set X_ 877
5	\$node_(1) set Y_ 928
6	\$node_(1) set Z_ 0.0000
7	\$ns_ at 2.000000 "\$node_(0) setdest 1160 414 8.246211"
8	\$ns_ at 5.000000 "\$node_(1) setdest 878 928 1.000000"

Le **modèle V-PROPAG** utilise comme entrée les données sur les catégories de sursol et la hauteur du sol de l'environnement pour calculer l'affaiblissement des signaux. Deux approches distinctes peuvent être utilisées pour intégrer le modèle V-PROPAG à ns-2. Dans la première, le simulateur ns-2 charge les données de l'environnement et calcule pour chaque transmission l'affaiblissement du signal suivant l'algorithme 2 présenté au chapitre 3. La seconde approche est celle présentée dans la section 3.3 du chapitre 3. Les zones de couvertures sont pré-calculées par le modèle V-PROPAG, le résultat est un fichier spécifiant pour chaque maille route de l'environnement la puissance reçue au niveau des mailles route qui appartiennent à sa zone de couverture radio. Le fichier est par la suite utilisé comme entrée de ns-2 qu'il charge au début de toute simulation. A chaque transmission, ns-2 détermine les mailles sur lesquelles se trouvent les antennes émettrice et réceptrice et récupère la puissance reçue à partir des données de couverture préalablement chargées. Nous avons opté pour la seconde approche qui nécessite un temps de calcul beaucoup plus faible. Il est en effet inutile de recalculer à chaque transmission la perte du signal étant donné que le modèle V-PROPAG se base sur des données statiques. L'inconvénient de cette approche est de ne pas inclure la densité du trafic routier dans les obstacles de propagation mais un affaiblissement de densité pourrait être ajouté dynamiquement lors du calcul dans ns-2.

Le tableau 4.2 compare les travaux sur l'étude des protocoles de routage présentés précédemment à notre travail d'un point de vue réalisme des modèles utilisés. Tous se basent sur ns-2 pour simuler les protocoles réseau mais utilisent différentes versions du simulateur et différents modèles de mobilité et de propagation radio.

	MAC	PHY	Mobilité de type véhicule	Propagation avec obstacles
[Jaap <i>et al.</i> , 2005]	✗	✗	✗	✗
[Marinoni & Kari, 2006]	✗	✗	✗	✗
[Härri <i>et al.</i> , 2006]	✗	✗	✓	✗
[Ramakrishnan <i>et al.</i> , 2011]	✓	✓	—	✗
[Dar <i>et al.</i> , 2009]	✗	✗	✓	✗
[Lochert <i>et al.</i> , 2003]	✗	✗	✓	✗
[Naumov <i>et al.</i> , 2006]	✗	✗	✓	✗
Notre étude	✓	✓	✓	✓

TABLE 4.2 – Prise en compte des caractéristiques des VANET dans l'étude des performances des protocoles de routage.

4.3 Simulations et résultats

4.3.1 Paramètres de simulation

Nous étudions dans cette section les performances des protocoles de routage AODV, DSR et OLSR dans le contexte de V-MBMM et V-PROPAG. AODV et DSR sont directement intégrés à ns-2. Pour la simulation de OLSR, nous avons utilisé le code libre UM-OLSR³ développé pour la version ns-2.34. L'environnement considéré dans la simulation est le centre ville de Belfort. Les tableaux 4.3 et 4.4 résument, respectivement, les paramètres de simulation de ns-2 et ceux des modèles V-MBMM et V-PROPAG.

La mobilité est simulée sur un espace de $2km \times 2km$ entre 12h00 et 12h15 avec une densité de 100, 150 et 200 véhicules. Les traces de mobilité ont été enregistrées pendant 300s en ignorant les premières et dernières 300s pour écarter les biais des périodes de démarrage et de fin du système, soit un total de 10mn. Le pas de maille utilisé pour décrire la ville de Belfort est de 25m. Afin d'avoir plus de précision dans les zones de couverture radio des mailles, nous avons utilisé un maillage plus fin de 5m pour le calcul de puissance reçue. A chaque maille de $5m \times 5m$ sont associés la même catégorie de terrain et la même hauteur que celle de la maille $25m \times 25m$ à laquelle elle appartient. Les caractéristiques des antennes sont positionnées de sorte à avoir un rayon de couverture maximal d'environ 350m avec la catégorie de terrain *C* qui est la plus dégagée en termes d'obstacles. Dans l'étude présentée, nous avons également considéré une modélisation par un cercle de la zone de couverture des nœuds avec Two-Ray Ground pour montrer l'impact des modèles de propagation sur les performances du système. Nous avons conservé les valeurs par défaut du standard 802.11p tel que spécifié dans ns-2. Ces valeurs sont indiquées dans le tableau 4.3,

3. http://masimum.inf.um.es/fjrm/?page_id=116

Paramètres		Valeurs
Environnement		Centre ville de Belfort $2500m \times 2500m$
Durée de chaque simulation		300s
Nombre de nœuds		100, 150, 200
Routage	AODV	–
	DSR	–
	OLSR	TC_INTERVAL 5s HELLO_INTERVAL 2s
802.11p(PHY/MAC)	Frequence	5,9Ghz
	Largeur de bande	10Mhz
	Puissance d'émission	0,001mW
	Sensibilité	-85dBm
	Modèle de propagation	Two-Ray Ground
Trafic de données	Type	CBR
	Nombre de source	5%, 10%, 15%, 20% de nœuds
	Intervalle inter paquets	0, 5s
	Taille des paquets	512 octets

TABLE 4.3 – Paramètres de simulation dans ns-2.

Paramètres		Valeurs
Environnement		Centre ville de Belfort $2500m \times 2500m$
V-MBMM	V_{min}, V_{max}	30km/h, 50km/h
	Durée feux	45s
	Trajectoire	Pas-à-pas
	Nombre véhicules	100, 150, 200
	Tranche horaire	12h-12h15
V-PROPAG	Taille des mailles	5m \times 5m
	Gain antenne	2dBi
	Hauteur antenne	1,5m
	Puissance émission	23dBm
	Sensibilité	-77dBm
	Frequence	5,9Ghz
	d_{max}	500m

TABLE 4.4 – Paramètres de simulation V-MBMM et V-PROPAG.

elles permettent d'avoir un rayon de couverture maximum de 200m avec le modèle TRG, à peu près équivalente à une couverture en catégorie *B* avec V-PROPAG. Les données transmises sont du type CBR (*Constant Bit Rate*), dans chaque scénario nous faisons varier le taux de mobiles qui génèrent les paquets de données de 5% à 20%. Les nœuds sources

et la durée des transmissions de données sont déterminés de manière aléatoire. Toutes les valeurs présentées dans la suite de ce chapitre sont des moyennes obtenues avec cinq traces de mobilité différentes pour prendre en compte le comportement pseudo-aléatoire de la simulation.

4.3.2 Motifs des pertes de paquets

L'un des apports de l'étude réalisée est l'analyse détaillée des mécanismes utilisés par chacun des protocoles dans le but d'identifier les techniques de routage les plus appropriées pour les réseaux véhiculaires. Le paramètre le plus représentatif de l'efficacité d'un protocole de routage est son taux de réception qui représente le nombre de paquets de données bien reçus par les destinataires. Pour une meilleure compréhension du comportement de chaque protocole, nous abordons l'étude par l'analyse des causes de pertes de données dans les réseaux mobiles ad hoc.

Quatre facteurs sont essentiellement à l'origine des pertes de paquets de données :

1. La route vers le destinataire n'est pas connue. Dans ce cas, le problème peut être lié à l'incapacité du protocole de routage à trouver une route vers la destination avant l'expiration du temps de validité des données à envoyer ou, au fait que le réseau est partitionné et que la route vers le destinataire n'existe pas.
2. Echec de transmission au niveau accès au canal à cause des collisions dues à plusieurs transmissions simultanées.
3. Dépassement de la capacité des files d'attente qui stockent les paquets de donnée pour lesquels la route vers le destinataire n'est pas encore découverte.
4. La longueur de la route dépasse le nombre maximum de sauts qu'un paquet de contrôle peut traverser, ce qui empêche la découverte de la route.

L'analyse des traces générées par le simulateur ns-2 montre que les deux principales causes de perte de paquets de données dans les VANET sont le fait que la route vers le destinataire n'est pas connue, que l'on notera NRTE (*No RouTE*), et le dépassement de capacité des files d'attente que l'on notera IFQ (*InterFace Queue*). Il est à noter que dans OLSR les paquets de données sont directement transmis si la table de routage contient une route vers le destinataire ou supprimés dans le cas contraire. De ce fait, seule NRTE est la principale cause de perte des paquets de données.

Les valeurs moyennes obtenues sur tous les scénarios sont calculées pour les modèles de propagation TRG et V-PROPAG et sont présentées dans le tableau 4.5.

En comparant les résultats de AODV à ceux de DSR, on constate que les pertes dans AODV sont essentiellement dues à NRTE et dans DSR à IFQ et ceci quelque soit le modèle

	TRG			V-PROPAG		
	AODV	DSR	OLSR	AODV	DSR	OLSR
NRTE	70%	8%	90%	75%	4%	94%
IFQ	19%	82%	-	22%	87%	-

TABLE 4.5 – Taux de perte de paquets dues à NRTE et IFQ.

de propagation utilisé. La raison est liée à la réaction de chacun des protocoles face à l'échec dans la découverte d'une route. Dans AODV, un nœud source qui ne reçoit pas de réponse à une requête de route au bout d'un certain délai, peut, tant que la route n'est pas trouvée, initier deux autres tentatives en retransmettant à nouveau un RREQ. En cas d'échec des trois tentatives, donc de la procédure de découverte de route, le nœud source déduit un échec de route (NRTE) et supprime tous les paquets de données contenus dans la file en attente d'envoi vers le destinataire. Le nœud relance la procédure de découverte de route au bout d'un certain délai. IFQ est déclaré par le nœud si la file d'attente des paquets en attente de découverte de route et d'envoi a atteint sa capacité maximale, la stratégie de gestion des files étant FIFO (*First In First Out*). Les anciens paquets sont alors supprimés de la file pour y mettre les nouveaux.

La réaction de DSR est différente, le nombre maximum de tentatives de transmission de RREQ dans une procédure de découverte de route est également de trois. Si aucune route n'est découverte à l'issue des trois tentatives, le nœud ne supprime pas les paquets de données mais les garde dans la file d'attente et vérifie périodiquement si lors des dernières mises à jour de la table de routage une route vers le destinataire a été définie. Si tel est le cas les paquets seront envoyés les uns à la suite des autres. Dans le cas contraire, les paquets ne seront supprimés de la file que si cette dernière atteint sa capacité maximale (FIFO), le nœud déclare alors IFQ comme cause de perte. Le nœud ne déduit une NRTE que s'il relance une procédure de découverte de route et qu'elle échoue. Dans les deux protocoles, les NRTE peuvent également être déclarées par les nœuds intermédiaires à la suite de l'échec de la procédure de réparation de route. Nous verrons dans les résultats suivants l'influence du comportement de chacun des protocoles sur le taux de réception des données.

4.3.3 Taux d'identification des routes

Nous avons analysé dans un second temps dans quelles conditions de connectivité les protocoles réussissent à trouver les routes vers les destinations et le taux de routes découvertes par protocole. On rappelle ici que l'analyse de la connectivité des liens du chapitre trois montre que 20% des liens ont une durée de vie inférieure à 5s et donc que la topologie

du réseau est extrêmement volatile. Les résultats obtenus avec V-PROPAG sont représentés par la première colonne de la figure 4.2. Ils montrent que dans les réseaux à faible densité (100 véhicules), donc à faible connectivité, lorsque le trafic de données est faible (5% et 10% de nœuds sont sources de données), AODV réussit à trouver plus de routes suivi de DSR puis OLSR. AODV et DSR étant des protocoles réactifs, ils ne calculent les routes qu'à la demande, les nœuds établissent les routes sur la base d'informations sur la topologie du réseau qui sont plus à jour comparées à OLSR où l'échange des informations est périodique. La validité des routes dans OLSR dépend des valeurs affectées aux fréquences de diffusion des messages HELLO et TC. De plus, la connectivité du réseau étant faible, les paquets TC ne sont pas assez propagés dans l'ensemble du réseau. En comparant AODV et DSR, AODV trouve plus de routes grâce à son mécanisme dynamique de calcul des routes de proche en proche.

Avec un trafic de données plus élevé (150 et 200 véhicules ou 100 véhicules avec plus de nœuds sources), OLSR présente les plus faibles taux pour les mêmes raisons que précédemment et les taux obtenus avec DSR sont légèrement supérieurs à ceux de AODV. La raison vient de la priorité donnée aux paquets de contrôle avec DSR. Alors que AODV ne différencie pas les paquets de données de ceux de contrôle, DSR associe à chaque type de paquet une file d'attente et donne plus de priorité pour l'envoi des paquets de contrôle. Plus de paquets RREQ et RREP sont transmis dans le réseau notamment lorsque le nombre de source de données est important. Ceci permet aux nœuds d'avoir une meilleure connaissance de la topologie du réseau et de découvrir ainsi plus de routes.

Dans le cas de réseaux à moyenne et à forte densité, la connectivité et la persistance du réseau sont meilleures. Plus de routes stables sont découvertes par les trois protocoles. Comme OLSR se base sur une approche proactive, il présente les plus faibles taux. Les résultats de AODV et DSR sont quasiment identiques.

Les valeurs de taux de routes présentées par la deuxième colonne de la figure 4.2 montrent que l'utilisation d'un modèle de propagation trop théorique conduit à des résultats complètement différents. TRG étant un modèle optimiste qui suppose des conditions idéales de propagation, la connectivité dans le réseau est toujours meilleure ; en particulier pour une faible densité de véhicule, le taux de routes trouvées passe du simple au double (40% à 80% avec 100 véhicules). Les taux de routes découvertes avec AODV et OLSR sont dans tous les scénarios plus élevés, comparés aux résultats obtenus avec V-PROPAG. Dans le cas de 200 véhicules, les taux avoisinent 100% dans AODV et 90% avec OLSR. En outre, à partir d'une densité de 150 véhicules, OLSR supplante systématiquement DSR. Comparé aux résultats obtenus avec V-PROPAG, DSR enregistre de meilleurs taux que OLSR uniquement avec une densité de 100 véhicules grâce à la priorité donnée aux paquets RREQ. A moyenne et à forte densité de nœuds, DSR perd cet avantage et la priorité

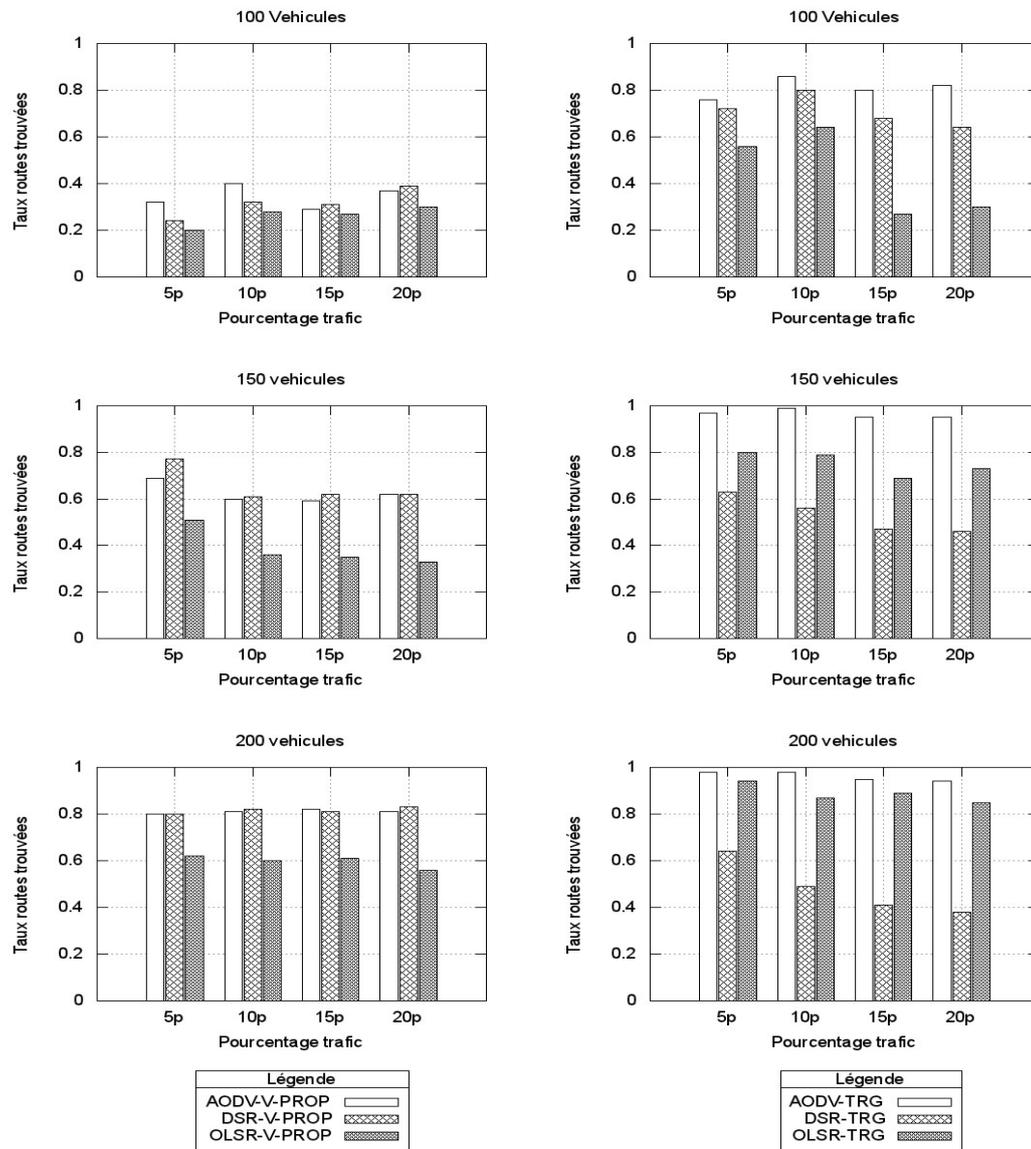


FIGURE 4.2 – Taux de routes découvertes par chacun des protocoles avec V-PROPAG (colonne gauche) et TRG (colonne droite) - Critère à maximiser.

donnée aux paquets de contrôle devient la cause de la dégradation des performances. La connectivité du réseau étant meilleure, le nombre de retransmissions des paquets RREQ explose et cause la saturation du réseau qui empêche une découverte de routes efficace.

Pour montrer les avantages et les inconvénients des mécanismes utilisés par les protocoles, nous analysons maintenant quatre métriques :

- La charge en trafic de contrôle : elle représente le nombre de paquets de contrôle

transmis sur le réseau. Les retransmissions de ces paquets sont également considérées dans le calcul.

- Le taux de livraison : il représente le taux de paquets de données bien reçus par les destinataires. C'est le rapport entre le nombre de paquets reçus et le nombre de paquets envoyés.
- Le nombre de saut : c'est le nombre de nœuds relais à travers lesquels les paquets de données transitent avant d'atteindre la destination.
- Le délai de bout en bout : c'est la différence entre l'instant de génération du paquet par la source et l'instant de sa réception par le destinataire. .

4.3.4 Charge en paquets de contrôle

La figure 4.3 représente le nombre de paquets de contrôle transmis et retransmis dans le réseau. Le nombre de paquets de contrôle générés avec DSR dans le cas de TRG étant très élevé par rapport au autres, les valeurs représentées sur les graphes sont les valeurs obtenues divisées par 5 (DSR-TRG/5).

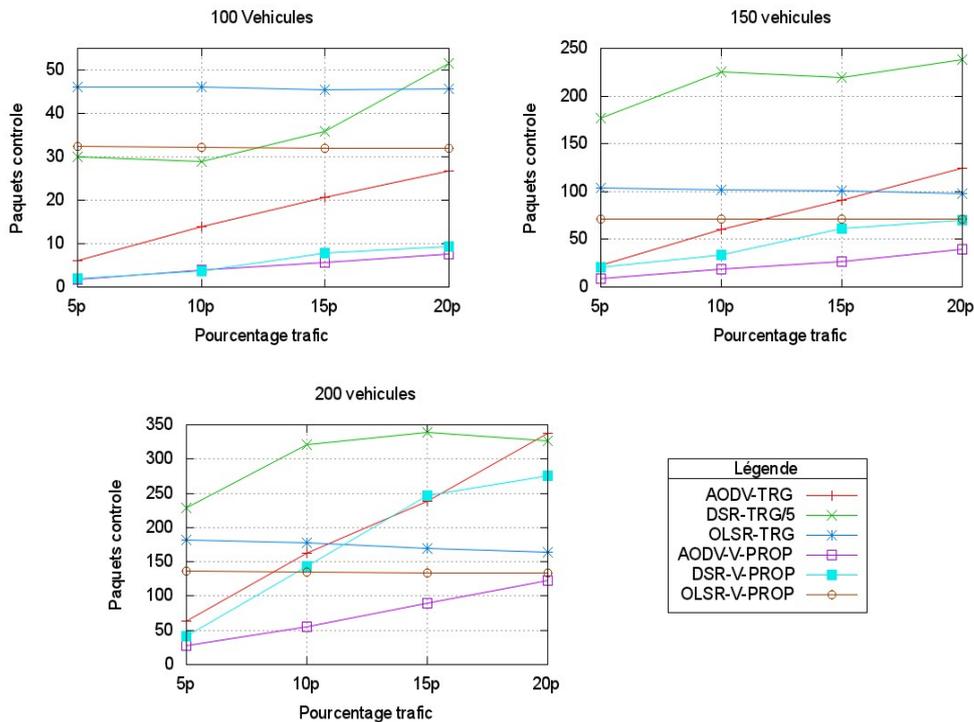


FIGURE 4.3 – Trafic de contrôle généré dans le réseau - Critère à minimiser.

La génération du trafic de contrôle dans OLSR étant indépendante du trafic de données, le nombre de paquets transmis est quasiment constant pour chaque densité. Il croît d'une

densité à l'autre à cause d'une part du nombre de nœuds qui augmente, et par conséquent du nombre de paquets HELLO et TC générés, et d'autre part en raison de la connectivité du réseau qui devient meilleure et qui permet plus de retransmissions des paquets TC. C'est également pour cette dernière raison que le trafic dans OLSR est supérieur dans TRG comparé à V-PROPAG, la connectivité de TRG étant très supérieure. Le taux de trafic de contrôle enregistré avec AODV et DSR avec le modèle V-PROPAG croît avec l'augmentation du nombre de source de données et ce quelque soit la densité des nœuds. La raison étant que le nombre de RREQ générées est proportionnel au nombre de nœuds sources. Le trafic augmente également avec l'augmentation de la densité puisque le nombre de sources de données augmente et, le réseau étant mieux connecté, plus de RREQ sont retransmis. Avec une connectivité optimiste, le nombre moyen de paquets de contrôle augmente sensiblement avec TRG comparé à V-PROPAG notamment dans DSR : le trafic de contrôle est de 12 fois plus important avec DSR et 3 fois plus important avec AODV.

Avec le modèle V-PROPAG et pour une densité de 100 véhicules, AODV et DSR génèrent quasiment le même nombre de paquets de contrôle qui est inférieur à celui de OLSR. La raison est que dans les protocoles réactifs les paquets de contrôle ne sont générés qu'à la demande et, étant donné que le nombre de source n'est pas élevé et que la connectivité dans le réseau est faible, peu de RREQ sont générés et retransmis. Avec OLSR le trafic de contrôle est généré périodiquement y compris lorsque les nœuds n'ont pas de données à transmettre. C'est pour cette raison que le nombre de paquets de contrôle générés par OLSR est supérieur à celui de AODV et DSR pour une densité de 150 véhicules. Avec cette densité, comme DSR donne plus de priorité au trafic de contrôle, le nombre de paquets générés croît plus rapidement avec l'augmentation des sources de données comparé à AODV. Avec 20% de nœuds sources, le nombre de paquets dans DSR est égal à celui de OLSR. Pour une densité de 200 véhicules, AODV continue à enregistrer les plus faibles valeurs et DSR génère beaucoup plus de paquets que OLSR dès que le pourcentage de source est supérieur à 10%.

Avec TRG, AODV génère le moins de paquets lorsque la connectivité du réseau est faible et le nombre de source de données n'est pas important. A partir de 17% de sources dans le cas de 150 véhicules et 12% dans le cas de 200 véhicules, le trafic de contrôle devient plus important que dans OLSR à cause des générations et retransmissions multiples des RREQ. Le trafic de contrôle dans DSR est nettement supérieur quelque soit le taux de trafic de données et ce à cause de la priorité donnée aux paquets de contrôle.

4.3.5 Taux de réception des paquets

La figure 4.4 montre les taux de réception de données obtenus avec les trois protocoles. Pour une densité de 100 véhicules, les taux de réception de chaque protocole sont nettement

supérieur avec TRG comparé à V-PROPAG. En ignorant l'effet des obstacles sur la propagation des signaux, TRG suppose une meilleure connectivité dans le réseau ce qui offre plus de probabilité d'établir les communications multi-sauts. AODV présente les meilleurs résultats car c'est le protocole qui découvre le plus de routes suivi de DSR puis OLSR. Avec V-PROPAG, la connectivité étant plus faible, les échecs de découverte de route sont plus fréquents. DSR étant plus tolérant à ce problème, il enregistre de meilleurs résultats que AODV. En gardant dans la file les paquets de données pour lesquels la découverte de route a échoué, DSR offre plus de chance aux paquets d'être transmis contrairement à AODV qui supprime directement toutes les données en attente.

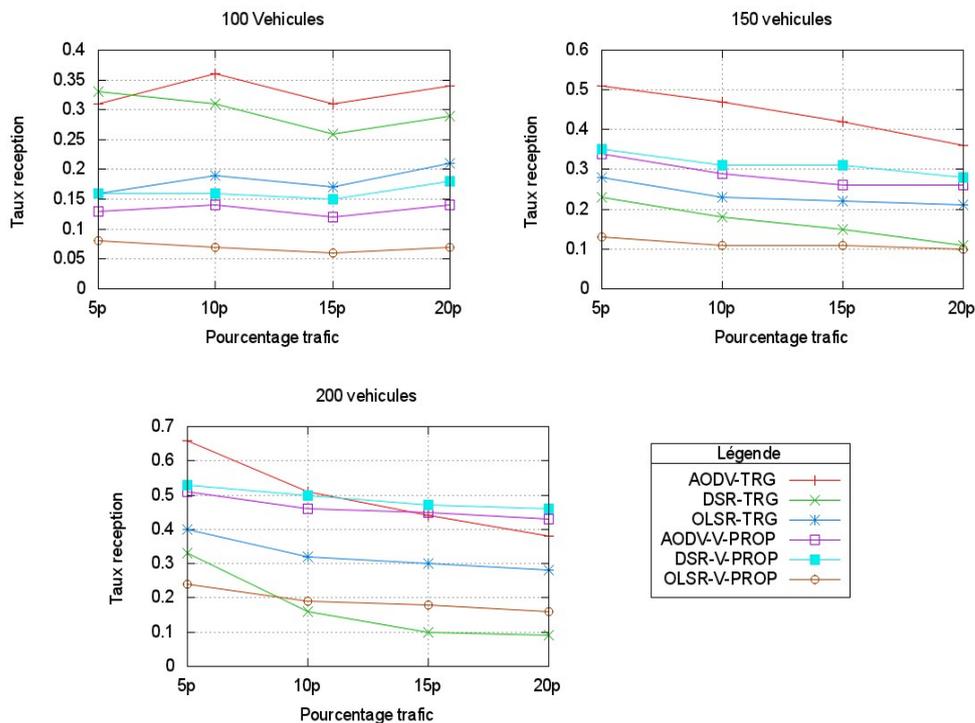


FIGURE 4.4 – Taux de réception de données - Critère à maximiser.

Avec le modèle TRG, le taux de réception dans DSR commence à chuter à partir d'une densité de 150 véhicules à cause du volume important du trafic de contrôle généré qui sature le réseau et empêche la découverte de routes et pénalise l'envoi des données. Les meilleurs taux sont obtenus avec AODV suivi de OLSR. En considérant tous les paramètres qui affectent la qualité des signaux, V-PROPAG présente des résultats totalement différents. Nous avons montré dans le chapitre précédent que les connexions dans les VANET sont très volatiles et que le problème du partitionnement du réseau est très présent. Ces deux phénomènes conduisent à de fréquentes ruptures de routes et à des fréquents échecs de découverte de routes. En générant plus de paquets de contrôle, en gardant plus d'une

route dans la table de routage de chaque nœud et en ne supprimant pas les données en cas d'échec de découverte de route, DSR offre de meilleurs résultats que AODV et OLSR. Les taux obtenus pour DSR avec V-PROPAG et des densités de 150 et 200 mobiles sont même supérieurs à ceux enregistrés avec TRG.

4.3.6 Nombre de sauts

La figure 4.5 montre le nombre moyen de nœuds traversés par les paquets de données correctement reçus par les nœuds destinataires. Quelque soit la densité des nœuds, les routes utilisées avec OLSR ont le plus faible nombre de sauts qui ne dépasse pas 3. Les nœuds utilisant OLSR découvrent pratiquement toutes les routes à deux sauts à partir des messages HELLO et toutes les routes à plus de deux sauts à partir des messages TC. La fréquence utilisée pour l'envoi des paquets HELLO étant plus élevée que celle utilisée pour les paquets TC, les routes à deux sauts ont plus de probabilité d'être valides lors de l'envoi des paquets de données. Le nombre de sauts est plus faible avec V-PROPAG à cause de la faible connectivité du réseau.

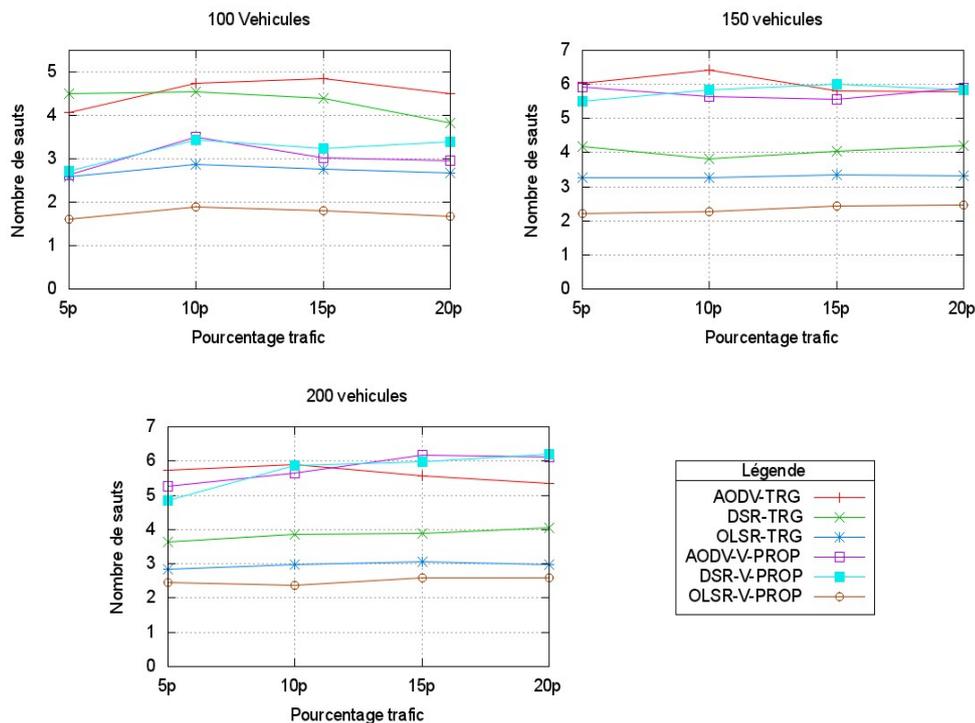


FIGURE 4.5 – Nombre moyen de sauts.

Pour toutes les densités de nœuds, le nombre de sauts dans AODV et DSR, obtenus avec le modèle V-PROPAG, est quasiment le même. Avec le modèle TRG, le nombre de

sauts avec DSR devient inférieur à celui de AODV dès que le pourcentage de nœuds source dépasse 10 ou que le nombre de véhicules est important. Le volume important du trafic de contrôle dans DSR empêche la découverte des routes à plusieurs sauts. Le nombre de sauts décroît d'ailleurs avec l'augmentation de la densité, 150 et 200 véhicules, malgré le fait que la connectivité réseau est meilleure. C'est le protocole AODV qui permet aux nœuds de mieux découvrir les routes à plusieurs sauts. La longueur moyenne des routes est d'environ 6 sauts pour une population de 150 véhicules. Cependant, le nombre de sauts avec AODV décroît avec l'augmentation du nombre de nœuds source à partir de 10% pour les deux densités, 150 et 200 véhicules. De même que DSR, la cause étant la surcharge en trafic de contrôle qui empêche la découverte des routes à plusieurs sauts.

Lorsque le modèle V-PROPAG est utilisé avec des densités de 150 et 200 véhicules, le nombre moyen de sauts dans les deux protocoles AODV et DSR est de 6. Malgré le fait que la connectivité soit plus faible comparé au modèle TRG, les deux protocoles tirent avantage du faible volume du trafic de contrôle qui libère le canal et permet la découverte des routes à plusieurs sauts.

4.3.7 Délai de bout-en-bout

Les derniers résultats présentés, mais pas les moins importants, concernent le délai moyen de bout en bout. La figure 4.6 montre que les délais enregistrés avec OLSR, avec les deux modèles TRG et V-PROPAG, sont très faibles et ne dépassent pas les 0,1s. Ceci est dû d'une part au fait que OLSR, étant un protocole proactif, il ne lance aucune procédure de découverte de route avant l'envoi des données. Les paquets sont directement transmis si la route est connue ou supprimés dans le cas contraire. La seconde raison est liée au fait que le nombre de nœuds intermédiaires par lesquels transitent les données est faible comparé à AODV et DSR. Les délais de transmission obtenus avec chacun des protocoles AODV et DSR sont quasiment les mêmes pour les deux modèles de propagation TRG et V-PROPAG. Les valeurs sont supérieures dans DSR comparé à AODV à cause du délai d'attente supplémentaire des données dans les files d'attente en cas d'échec de découvertes de routes.

4.3.8 Synthèse

Le résultat majeur de cette analyse est la mise en évidence de l'impact des modèles de propagation radio sur les résultats de la simulation. En effet, les résultats obtenus diffèrent d'un modèle à l'autre et les performances peuvent complètement s'inverser comme c'est le cas de DSR qui, avec le modèle TRG, présente les plus faibles taux de réception alors qu'avec V-PROPAG, qui est un modèle plus réaliste, il enregistre les meilleurs taux. Se

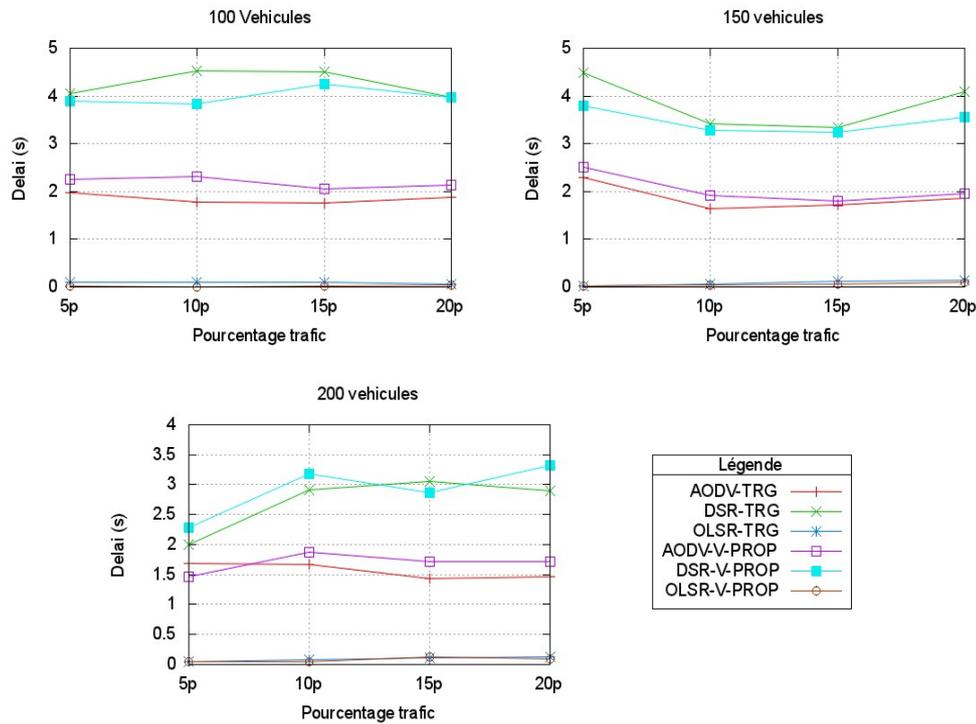


FIGURE 4.6 – Délai moyen de bout-en-bout - Critère à minimiser.

baser ainsi sur des modèles de propagation simplistes conduit à des conclusions qui peuvent être complètement faussées. De ce fait seuls les résultats obtenus avec V-PROPAG sont discutés dans cette synthèse.

Le rendement des protocoles proactifs dépend essentiellement de la connectivité du réseau et de sa fréquence de variation. L'étude de la connectivité présentée dans le chapitre 3 a montré que plus de 20% des liens entre voisins directs ont une durée inférieure à 5s. En envoyant des messages HELLO toutes les 2s, OLSR suppose qu'un lien dure au minimum 2s ce qui est dans la plupart des cas erroné. De plus, sachant que le voisinage distant, en termes de nombre de sauts, d'un nœud varie plus rapidement que son voisinage immédiat, les informations obtenues par chaque nœud à partir des messages TC deviennent très rapidement obsolètes. Les résultats montrent d'ailleurs que le nombre maximum de nœuds intermédiaires utilisés pour l'acheminement des données est de 3. Pour répondre plus rapidement au changement de topologie, OLSR peut envoyer plus fréquemment les paquets HELLO et TC, cependant, ceci peut engendrer un trafic de contrôle très important qui surchargera le réseau et perturbera toutes les communications. En raison de la forte dynamique du réseau, il est évident que les protocoles proactifs ne peuvent pas être utilisés dans le cadre des VANET.

Parmi les mécanismes utilisés par les protocoles de routage réactifs, le plus important est

celui de la découverte de routes. Les résultats ont montré que le mécanisme de découverte de routes et la réaction du protocole à un échec de découverte de routes sont les facteurs prédominants des performances des protocoles réactifs, ajouté à cela la connectivité du réseau et sa fréquence de variation. Dans le cas d'une faible connectivité, le réseau est partitionné en plusieurs petits groupes de nœuds isolés. La baisse de performances de AODV et DSR est due au manque de liens entre les nœuds qui empêche les communications multi-sauts. Une technique qui peut être utilisée par les protocoles pour l'acheminement des données est celle du *store-carry-forward* utilisée dans certains protocoles géographiques. Selon cette technique, le nœud garde à son niveau le paquet de données jusqu'à ce qu'il rencontre un autre nœud qui peut l'acheminer vers le destinataire. Cependant, ceci dépend totalement du type d'applications : est ce que les données transmises sont tolérantes aux délais ?

A moyenne et forte densité de nœuds, la connectivité est meilleure. Les résultats montrent que DSR présente les meilleurs taux de réception. En évitant la suppression directe des paquets de données à la suite d'un échec de la procédure de découverte de route, DSR offre plus de probabilité aux données d'être envoyées avec un léger délai supplémentaire. Ce mécanisme est semblable à celui du *store-carry-forward* à l'exception que les données ne sont gardées au niveau des nœuds que pour un délai très limité. Les taux de réception enregistré avec AODV sont proches de ceux de DSR mais avec des délais de bout-en-bout et trafic de contrôle plus faibles. AODV tire profit du fait qu'il génère moins de paquets de contrôle que DSR pour découvrir plus rapidement les routes et transmettre plus de données.

Dans la conception des algorithmes de routage basés sur la topologie, le réseau est supposé suffisamment connecté pour permettre les communications de bout-en-bout entre tout couple de nœuds. Les protocoles ne prennent pas en compte l'un des problèmes majeurs des VANET qui est le partitionnement du réseau. L'utilisation d'un mécanisme similaire au *store-carry-forward* et la prise en compte d'informations supplémentaires sur l'état des liens et leur variation pourraient conduire à de meilleures performances.

4.4 Dissémination d'informations sur un service d'alerte

Toujours dans l'objectif de démontrer l'influence de la modélisation sur les résultats de simulation, nous avons réalisé d'autres tests en considérant un service de sécurité simple. Un exemple d'application de sécurité, populaires dans les VANET, est l'alerte d'un accident. Dans cette application, un véhicule qui provoque un accident diffuse un message d'alerte à l'attention de tous les véhicules qui se dirigent vers le lieu de l'accident. Le message permet aux conducteurs proches du lieu de l'accident de ralentir afin d'éviter les accidents

en cascade, et aux conducteurs éloignés de changer leur itinéraire et de l'adapter aux nouvelles conditions de la route. Le message sert également à alerter les unités de secours pour une intervention en urgence.

Nous avons développé un protocole simple de dissémination d'information sous ns-2. Ce protocole exécute, en plus des commandes usuelles qui permettent de configurer la position et le mouvement des nœuds, une commande qui demande à un nœud de diffuser à un instant donné un message de type 'ACCIDENT'. Le message correspond à un paquet de données de type CBR diffusé par le nœud accidenté à une fréquence de deux paquets par seconde. Chaque nœud qui reçoit le message le diffuse à son voisinage immédiat. Il est clair que ce mécanisme de diffusion manque d'efficacité, mais rappelons que notre objectif est de montrer l'intérêt d'une modélisation de propagation du signal radio réaliste et non l'étude des performances d'une application donnée.

Pour simuler un accident au niveau mobilité, nous avons configuré le modèle V-MBMM de sorte à forcer un véhicule, le véhicule accidenté, à s'arrêter durant la simulation. L'arrêt du véhicule au milieu de la route influence la mobilité de tous les véhicules voisins.

Quatre métriques ont été mesurées :

- Le taux de réception : il représente le nombre de nœuds du réseau ayant reçu l'information. C'est le rapport entre le nombre de nœuds simulés et le nombre de nœuds qui ont reçu l'information.
- Le nombre de sauts : il correspond au nombre moyen de nœuds relais traversés par le paquet avant sa réception par chacun des véhicules. Seule la première copie du paquet reçue par chaque nœud est considérée dans le calcul.
- Le délai : il représente la moyenne des différences entre l'instant de réception de la première copie du paquet par chaque nœud et son instant d'envoi par le nœud accidenté.
- La distance : c'est la distance moyenne du lieu de l'accident à laquelle les nœuds ont reçu la première copie du paquet.

Les tests ont été réalisés avec les deux modèles V-PROPAG et TRG en faisant varier le nombre de nœuds entre 40 et 100. La durée de simulation est de 300s et l'espace simulé est de $2000m \times 2000m$. Les valeurs des autres paramètres sont celles spécifiées dans les tableaux 4.3 et 4.4.

La figure 4.7 montre les valeurs des quatre métriques obtenues avec les deux modèles de propagation. Les graphes montrent que TRG étant plus optimiste sur la couverture radio avec obstacles, cela conduit à de meilleurs résultats comparé à V-PROPAG et ce quelque soit la densité des nœuds. Avec 40 nœuds, malgré la faible densité, presque 60% des

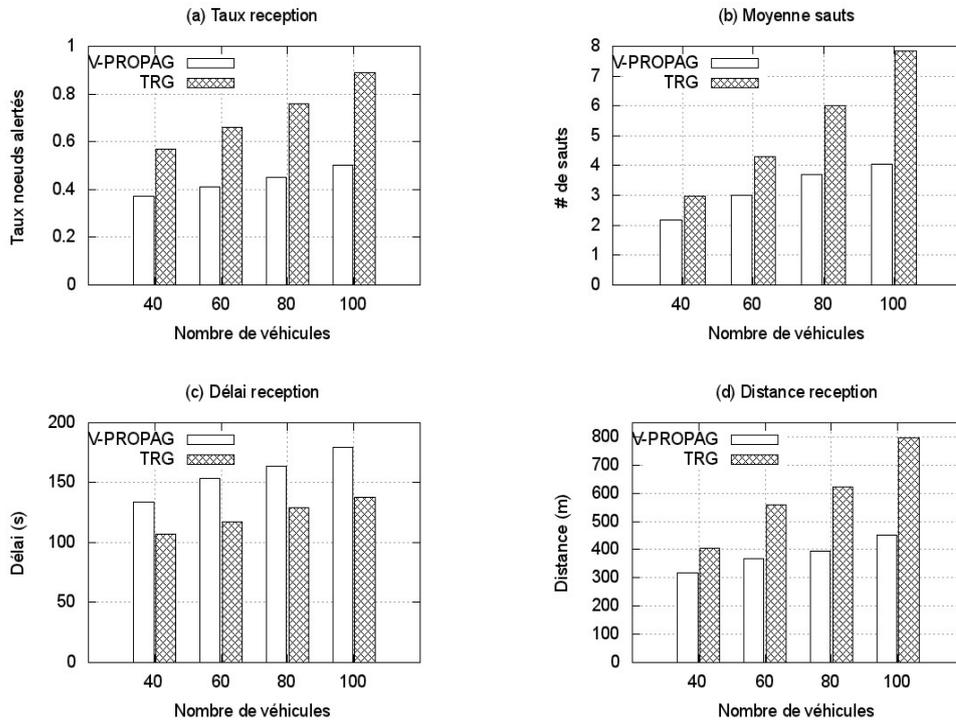


FIGURE 4.7 – Performances de l'application "Alerte d'un accident" avec les modèles V-PROPAG et TRG.

véhicules reçoivent l'alerte. Ce taux croît avec l'augmentation de la densité pour atteindre 90% lorsque le nombre de véhicules est de 100. Avec V-PROPAG les taux sont quasiment divisés par deux. A cause des obstacles de l'environnement, seuls 38% des véhicules sont alertés lorsque la densité est de 40 nœuds et 45% avec une densité de 100 nœuds. La même observation peut être faite pour les autres métriques. Avec TRG la longueur moyenne des routes par lesquelles transitent les paquets lorsque la densité est de 100 véhicules est de 7,8 contre seulement 4 avec le modèle V-PROPAG. La raison étant que TRG sous estime le problème du partitionnement du réseau en supposant une meilleure connectivité. La figure 4.7.d montre d'ailleurs que les paquets arrivent dans le cas de TRG à une distance moyenne de 800m du lieu de l'accident contre 450m dans le cas de V-PROPAG. Enfin, la figure 4.7.c montre que les alertes arrivent plus tôt aux conducteurs avec le modèle TRG puisque il est plus probable de trouver plus rapidement la route vers chaque nœud. Sur l'ensemble des résultats, on voit que TRG surestime de 30% à 50% la performance du service.

4.5 Conclusion

Dans l'étude présentée dans ce chapitre, nous nous sommes appuyé sur des modèles qui reproduisent le plus fidèlement possible les mécanismes et comportement des composantes

d'un réseau véhiculaire tant au niveau simulation des protocoles réseaux en utilisant la version de ns-2 qui implémente les modèles les plus réalistes, qu'au niveau mobilité et propagation radio en intégrant à ns-2 les deux modèles V-MBMM et V-PROPAG. Les performances enregistrées avec le modèle théorique TRG montrent l'impact des modèles utilisés dans la simulation sur la validité des résultats. Les valeurs des principales métriques évaluées sont très surestimées par rapport à celles obtenues avec le modèle V-PROPAG. Cela peut même conduire à de faux jugements sur la pertinence des protocoles de routage comme on l'a vu entre DSR et AODV où la performance des taux de réception peut être inversée entre TRG et V-PROPAG.

L'analyse des performances et des mécanismes des protocoles AODV, DSR et OLSR a montré qu'une approche proactive ne peut être adoptée pour le routage dans les réseaux véhiculaires. Le réseau étant très dynamique et volatile, les informations sur la topologie, maintenues au niveau de chaque nœud, deviennent dans la plupart des cas obsolètes lors de l'envoi des données. Le mécanisme déterminant dans le cas des protocoles réactifs est celui de la découverte de routes. Pour être efficace, un protocole ne doit pas surcharger le réseau avec le trafic de contrôle, comme c'est le cas de DSR, et ne doit pas supprimer directement les paquets à la suite d'un échec de découverte de routes, comme dans le cas de AODV. Les protocoles doivent intégrer des mécanismes qui leur permettent de tirer profit du changement de la topologie du réseau telle que la technique du store-carry-forward.

Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans cette thèse porte sur la modélisation et la simulation des réseaux véhiculaires, l'étude de la connectivité radio et des performances des protocoles et mécanismes de routage dans le cadre des VANET. Nous avons montré l'influence d'une modélisation réaliste de la mobilité et de la propagation radio sur la fiabilité des résultats. La modélisation des VANET inclut deux aspects, protocolaire qui concerne les protocoles de communication qui interviennent dans les échanges de données et, comportementale qui modélise la dynamique des entités qui composent le réseau. Dans cette thèse, nous nous sommes focalisés sur ce second aspect et nous avons proposé un nouveau modèle de mobilité et un nouveau modèle de propagation radio pour les réseaux véhiculaires.

Les modèles de mobilité proposés dans la littérature diffèrent par le niveau de détail et les informations à partir desquels sont déduits les schémas de mobilité. Pour atteindre le niveau de réalisme requis, la plupart des recherches se sont concentrées sur une modélisation fiable des caractéristiques de la route (vitesse limite, voies multiples, panneaux de signalisation, régulation des intersections...) et de la réaction des conducteurs en fonction de ces caractéristiques. Le modèle de mobilité proposé dans cette thèse enrichit les travaux existants qui, en plus de tenir compte des propriétés des routes, s'appuie sur une modélisation réaliste de la répartition de la population dans l'environnement simulé en fonction de l'attractivité horaire des zones de cet environnement. Dans l'étude de la connectivité radio, nous avons montré l'impact important de la répartition de la population sur la topologie du réseau. Le modèle V-MBMM proposé est un modèle générique qui détermine le mouvement des véhicules à partir de données topographiques et socioéconomiques réelles concernant les caractéristiques des infrastructures et la répartition des individus dans l'environnement selon leur motif de déplacement et l'attractivité des lieux au regard de ces motifs. En s'appuyant sur ces données, le modèle définit des configurations du trafic réalistes aussi bien dans le domaine temporel que spatial. Cet aspect, malgré son important impact, est modélisé de manière aléatoire voire négligé dans la plupart des modèles existants.

La modélisation de la propagation radio dans les VANET n'a pas reçu autant d'intérêts que celle de la mobilité. Les travaux de recherche s'appuient sur les modèles usuels

qui représentent les zones de couverture par un cercle autour de chaque antenne sous l'hypothèse d'un espace plat, ouvert et non obstrué. Les quelques modèles qui tiennent compte de l'effet des obstacles utilisent un simple paramètre pour différencier le niveau d'affaiblissement des signaux selon que l'environnement simulé est urbain, suburbain, rural ou autoroutier. Cette modélisation globale manque de réalisme car les environnements du même type sont supposés avoir des caractéristiques identiques et dans chaque type d'environnement, la dégradation de la qualité des signaux est considérée la même en tout lieu. Le modèle proposé, V-PROPAG, utilise des informations plus détaillées pour prédire avec plus de précision la couverture radio des antennes embarquées dans les véhicules. Le modèle ne s'appuie pas sur une classification globale de l'environnement en l'un des quatre types précédemment cités. Les données sur l'environnement utilisées dans le modèle V-PROPAG sont discrétisées en mailles de taille identique. Basé sur le modèle de propagation ERCEG défini pour les réseaux cellulaires, V-PROPAG classe individuellement les mailles en trois catégories de terrain selon leur niveau d'obstruction. Les catégories sont déterminées à partir d'informations géographiques sur les caractéristiques et la densité des infrastructures présentes sur chaque maille. Le path loss entre tout couple de véhicules communicants est alors déterminé en fonction des catégories de terrain et de l'altitude des mailles traversées par l'onde radio.

Pour la validation et l'évaluation des deux modèles V-MBMM et V-PROPAG, nous avons réutilisé le code de l'application TM (*Territoire Mobile*) développée dans le cadre d'un projet réalisé à l'UTBM. Nous avons apporté plusieurs modifications et extensions à l'application TM pour pouvoir simuler la mobilité et la propagation radio de véhicules dans un environnement urbain ou suburbain quelconque. En plus de permettre la visualisation, en temps réel, des déplacements des véhicules et de l'évolution de leur zone de couverture radio, l'application génère des fichiers traces et des statistiques à partir desquels ont été évalués et validés les deux modèles. Nous avons appliqué le modèle V-MBMM sur deux environnements réels, la communauté d'agglomération Belfortaine et la communauté d'agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines. Les résultats des tests ont montré que le comportement des conducteurs tels que simulés par le modèle est très proche des habitudes et activités observées dans la vie quotidienne. Pour la validation et l'ajustement des paramètres et formules du modèle V-PROPAG, nous avons défini des environnements de simulation et analysé le comportement du modèle en faisant varier les caractéristiques de l'environnement. Les tests réalisés ont montré qu'en tenant compte des principaux paramètres qui influencent la propagation des signaux, le modèle V-PROPAG représente avec plus de précision et d'exactitude la couverture radio des véhicules en environnements urbain et suburbain qu'avec les modèles théoriques fréquemment employés.

Deux objectifs peuvent être visés par le développement de simulateurs réseaux. D'une part l'analyse et l'identification des propriétés du réseau qui est une étape cruciale pour la

définition des solutions les plus adéquates et les plus performantes ; et d'autre part l'évaluation et l'amélioration des solutions existantes et nouvelles. Ces deux points ont été traités dans cette thèse en étudiant la connectivité radio dans les VANET et les performances des protocoles et mécanismes des protocoles de routage dans ces réseaux.

Les propriétés qui différencient les VANET des autres réseaux mobiles sont la forte mobilité des nœuds, la diversité spatio-temporelle de la densité des nœuds et le milieu de propagation obstrué défavorable à l'établissement des communications sans fil. Les conséquences directes de ces caractéristiques sont une connectivité intermittente, très volatile, causée par la mobilité des nœuds et la dégradation des signaux, la surcharge en communications du réseau dans les scénarios à forte densité de nœuds et le partitionnement du réseau dans le cas d'une faible densité de nœuds. Ce sont ces propriétés que nous avons analysé dans l'étude de la connectivité radio. Pour garantir la fiabilité des résultats obtenus, nous avons considéré dans les tests de simulation un environnement réel, qui est le centre ville de Belfort, et utilisé les modèles, V-MBMM pour la simulation de la mobilité et V-PROPAG pour la simulation de la propagation des signaux radio. Nous avons d'ailleurs montré l'impact du choix des modèles de simulation en présentant les résultats obtenus avec le modèle Two-Ray Ground, le plus utilisé dans les études actuelles.

Les métriques que nous avons évaluées sont celles qui renseignent sur la possibilité et la qualité des échanges de données dans les VANET. Ces échanges s'appuient en général sur les communications multi-sauts qui sont affectées par la durée moyenne des liens, le nombre de voisins de chaque nœud et le partitionnement du réseau en groupes de nœuds isolés. Les résultats des scénarios que nous avons considéré ont montré que : *(i)* la durée moyenne de 20% de liens radio ne dépasse pas 5s, *(ii)* la mobilité et la répartition de la population n'étant pas uniforme, la topologie du réseau a une grande variabilité spatiale et temporelle, *(iii)* le nombre de voisins de chaque nœud est très disparate, fort par endroit et par période et faible par ailleurs, *(iii)* le problème du partitionnement du réseau en groupes isolés de nœuds est présent dans tous les scénarios, la taille et le nombre de groupes varie considérablement d'une zone à l'autre et d'une période de la journée à l'autre.

Pour l'analyse des protocoles et mécanismes de routage, nous avons intégré les modèles V-MBMM et V-PROPAG à la version ns-2.34 du simulateur réseau ns-2. Trois protocoles de routage parmi les plus courants basés sur la topologie ont été étudiés, le protocole proactif OLSR et les protocoles réactifs AODV et DSR. L'analyse des performances a montré qu'en raison de la forte dynamique de la topologie du réseau, les protocoles proactifs ne sont pas adaptés aux VANET. L'image du réseau que maintiennent les nœuds par l'échange périodique des informations sur la topologie devient rapidement obsolète. Le rendement des protocoles réactifs est déterminé par le mécanisme utilisé pour la découverte des routes et la réaction des protocoles à un échec de découverte de route. Selon la période et la

zone considérées, deux situations peuvent avoir lieu dans les réseaux véhiculaires : faible densité, dans ce cas le protocole de routage doit faire face aux problèmes de la connectivité intermittente et du partitionnement du réseau ; forte densité, le problème qui peut se poser en plus de la connectivité intermittente est l'inondation du réseau par le trafic de contrôle. Pour être efficace, un protocole réactif doit utiliser des mécanismes qui d'une part minimisent le surcout en trafic de contrôle tout en découvrant le plus de routes, et d'autre part tirent profit du changement de la topologie du réseau en saisissant toute opportunité qui se présente pour la transmission de données. Nous avons montré que AODV et DSR sont compétitifs avec un avantage pour DSR à faible densité et pour AODV à forte densité.

Les deux objectifs visés par le travail réalisé au cours de cette thèse étaient la conception de modèles plus réalistes que la plupart des modèles existants pour la simulation des réseaux véhiculaires, et l'étude et l'identification, en se basant sur ces modèles, des propriétés des VANET. Les résultats auxquels nous sommes parvenus ouvrent la voie à plusieurs perspectives qui peuvent faire objets de travaux futurs.

Les modèles V-MBMM et V-PROPAG peuvent être utilisés en association avec des simulateurs réseaux, exemple ns-2, pour l'étude de la faisabilité et de la qualité des applications développées pour les VANET. La plupart de ces applications ont pour objectif de fournir aux conducteurs des informations sur les incidents et les conditions de la circulation leur permettant d'éviter toute situation dangereuse et d'améliorer les conditions du voyage. Les informations parviennent aux conducteurs via des communications de proche en proche qu'ils utilisent pour modifier leur parcours. La simulation de tels scénarios nécessite une interaction, en temps réel, entre le modèle de mobilité et le simulateur réseau. Le modèle de mobilité fournit au simulateur les positions des nœuds qu'il utilise pour déterminer les liaisons radio, et le simulateur réseau communique au modèle les informations issues de l'application qui affectent le schéma de mobilité. La modélisation par V-MBMM du déplacement des véhicules sur un graphe pondéré et le calcul pas-à-pas ou hybride de la trajectoire permettent au modèle d'intégrer l'effet des informations fournies par le réseau sans apporter de modification aux mécanismes utilisés. Le changement des conditions de circulation peut être interprété et reproduit par le modèle en redéfinissant les poids d'attractivité et les attributs des routes. Le mouvement des véhicules étant guidé par ces paramètres, il est possible d'inhiber certains déplacements, de modifier l'attractivité des routes, etc. La difficulté réside dans la manière dont doivent être interprétées les nouvelles informations : quelle est la nouvelle vision de la route au niveau de chaque véhicule ? Quelles sont les routes impliquées ? A quel moment les modifications doivent être appliquées à chacune des routes ? Et quelles sont les nouvelles valeurs à attribuer aux routes ? Ces informations doivent tenir compte des délais nécessaires pour que les véhicules reçoivent l'information et des comportements des conducteurs face à toute situation. Ces évolutions sur la conception dynamique du système sont assez complexes et nécessiteraient d'intro-

duire un modèle d'aide à la décision qui analyserait la solution et proposerait plusieurs décisions possibles dans un contexte multicritère.

La seconde perspective concerne le modèle de propagation radio proposé. Ce dernier est une adaptation aux réseaux véhiculaires du modèle empirique ERCEG défini pour les réseaux cellulaires. Le modèle ERCEG calcule le path loss en fonction de plusieurs constantes sur le terrain dont les valeurs sont positionnées à partir des mesures expérimentales. Pour la détermination et la validation des valeurs des constantes dans le cas de réseaux véhiculaires, nous avons effectué plusieurs tests de simulation en considérant tous les paramètres pris en compte dans le modèle ERCEG. Il serait cependant nécessaire d'ajuster et de valider les valeurs des constantes ainsi que les formules du modèle proposé en effectuant des mesures dans des environnements réels et de comparer les données mesurées aux données issues des simulations. Ces mesures demandent un investissement en matériel de mesures mais apporteraient encore plus de précision à la démarche. Elles devront être réalisées pour pouvoir rendre le système véritablement opérationnel auprès d'autres chercheurs.

L'étude de la connectivité radio et des performances des mécanismes de routage dans les VANET a permis d'une part de dégager les propriétés des réseaux véhiculaires et d'autre part de souligner les problèmes auxquels doivent répondre les protocoles de routage. Les conclusions et résultats auxquels nous avons abouti peuvent être utilisés pour la conception d'algorithmes de routage plus appropriés pour les VANET. Des algorithmes dynamiques qui tiennent compte de la diversité spatiale et temporelle de la topologie des VANET et des caractéristiques des liens radio dans ces réseaux. Il serait également intéressant d'enrichir l'analyse des mécanismes de routage en considérant les nouveaux protocoles qui se basent sur les informations géographiques pour la détermination des routes.

Publications

Revue internationale

K. Ait Ali, O. Baala and A. Caminada, Revisiting vehicular network connectivity with radio propagation model. *Telecommunication Systems Journal*, pp. 1-13, 3 September 2011.

Conférences internationales avec actes et comité de sélection

K. Ait Ali, O. Baala and A. Caminada. Routing Mechanisms Analysis in Vehicular City Environment. *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, VTC2011-Spring*, Budapest, Hungary, May 15-18, 2011.

K. Ait Ali, O. Baala and A. Caminada. Evaluating vehicular radio connectivity with environment-based metrics. *The 3rd Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference, WMNC2010*, Budapest, Hungary, October 13-15, 2010.

K. Ait Ali, A. Gandron, A. Caminada and L. Moalic. Vehicular radio connectivity in urban environment, *The 7th International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS2010*, United Kingdom, September 19-22, 2010.

K. Ait Ali, M. Lalam, L. Moalic and O. Baala. V-MBMM : Vehicular Mask-Based Mobility Model. *The 9th International Conference on Networks, ICN2010*, French Alps, France, April 11-16, 2010.

Autres communications

K. Ait Ali. Study on Vehicular Radio Connectivity, *Réunion RGE (Réseaux Grand Est) du groupe de recherche ASR du CNRS*, Reims, 17 février 2011.

Bibliographie

- [1609.1, 2006] IEEE P1609.1. Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager. *IEEE Computer Society*, 2006.
- [1609.2, 2006] IEEE P1609.2. Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Security Services for Applications and Management Messages. *IEEE Computer Society*, 2006.
- [1609.4, 2006] IEEE P1609.4. Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation. *IEEE Computer Society*, 2006.
- [1609.3, 2007] IEEE P1609.3. IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services. *IEEE Computer Society*, 2007.
- [Abdalla *et al.*, 2007] G. M. T. Abdalla, M. A. Abu-Rgheff and S.M. Senouci. Current Trends in Vehicular Ad Hoc Networks. *International Workshop on ITS for Ubiquitous Roads (UBIROADS)*, *IEEE GIIS*, Marrakech, Morocco July 2007.
- [Ammoun *et al.*, 2006] S. Ammoun, F. Nashashibi, C. Laugeau, *Real-time crash avoidance system on crossroads based on 802.11 devices and GPS receivers*, In IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC'06. pp. 1023-1028, Sept. 2006.
- [Andrisano *et al.*, 2000] O. Andrisano, M. Nakagawa, R. Verdone. Intelligent Transportation Systems : The Role of Third-Generation Mobile Radio Networks. *IEEE Communications Magazine*, Septembre, 2000.
- [Artimy *et al.*, 2004] M.M. Artimy, W. Robertson and W.J. Phillips Connectivity in inter-vehicle ad hoc networks *Proc. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* , pp. 293-298, Canada, May 2004.
- [Bai *et al.*, 2003] F. Bai, N. Sadagopan, and A. Helmy. The IMPORTANT Framework for Analyzing the Impact of Mobility on Performance of Routing for Ad Hoc Networks. *AdHoc Networks Journal - Elsevier Science*, Vol. 1, Issue 4, pp. 383-403, November 2003.
- [Bai *et al.*, 2006] F. Bai, T. ElBatt, G. Holland, H. Krishnan and V. Sadekar. Towards Characterizing and Classifying Communication-based Automotive Applications from a Wireless Networking Perspective. *First IEEE Workshop on Automotive Networking and Applications (in conjunction with Globecom)*, December 2006.

- [Balasubramanian *et al.*, 2008] A. Balasubramanian, R. Mahajan, A. Venkataramani, B. N. Levine, J. Zahorjan. Interactive WiFi Connectivity For Moving Vehicles. *Proc. of ACM Sigcomm*, Seattle, WA, USA, August 2008.
- [Barr *et al.*, 2005] R. Barr, Z.J. Haas and R.V. Renesse. Scalable Wireless Ad hoc Network Simulation, chapter 19, pages 297-311. CRC Press, August 2005.
- [Basagni *et al.*, 1998] S. Basagni, I. Chlamtac, V. R. Syrotiuk, and B. A. Woodward. A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM). *Proc. 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 76-84, 1998.
- [Biswas *et al.*, 2006] S. Biswas, R. Tatchikou, and F. Dion. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 1, pp. 74-82, 2006.
- [C2C, 2002] Car-to-car cooperation for vehicular ad-hoc networks. *An AquaLab Project*, 2002. Disponible à <http://www.aqualab.cs.northwestern.edu/projects/C3.html>.
- [Camp *et al.*, 2002] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. *A survey of mobility models for ad hoc network research*, Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC) : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, Trends and Applications, 2(5) : pp. 483-502, 2002.
- [Chen *et al.*, 2007] Q. Chen, F. Schmidt-Eisenlohr, D. Jiang, M. Torrent-Moreno, L. Delgrossi and H. Hartenstein. Overhaul of ieee 802.11 modeling and simulation in ns-2. *Proc. 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, Greece, 2007.
- [Choffnes & Bustamante, 2005] D.R. Choffnes and F.E. Bustamante. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks. *Proc. of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp. 69-78, New York, 2005.
- [Clausen & Jacquet, 2003] T.H. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing (OLSR) *RFC 3626*, October 2003.
- [ComCar, 2001] ComCar, Communication and Mobility by Cellular Advanced Radio. <http://www.ibr.cs.tu-bs.de/projects/comcar/>.
- [Conceição *et al.*, 2008] H. Conceição, M. Ferreira and J. Barros. On the Urban Connectivity of Vehicular Sensor Networks. *Proc. 4th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'08)*, pp 112-125, Greece, June 2008.
- [Conceição *et al.*, 2009] H. Conceição, M. Ferreira and J. Barros. A Cautionary View of Mobility and Connectivity Modeling in Vehicular Ad-Hoc Networks. *Vehicular Technology Conferencen, VTC Spring*, pp.1-5, April 2009.
- [CORSIM, 2010] TSIS-CORSIM Traffic Software Integrated System - Corridor Simulation. <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/>

- [Dar *et al.*, 2009] K. Dar, M. Bakhouya, J. Gaber, M. Wack. Evaluating Geographic Routing Protocols for Vehicular Ad-hoc Networks. *3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pp.1-5, December 2009.
- [ElBatt *et al.*, 2006] T. ElBatt, S. Goel, G. Holland, H. Krishnan, J. Parikh. Cooperative Collision Warning Using Dedicated Short Range Wireless Communications. *ACM VANET Workshop*, Sept. 2006.
- [Erceg *et al.*, 1999] V. Erceg, L.J. Greenstein, S.Y. Tjandra, S.R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A.A. Julius and R. Bianchi. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 17, pp. 1205-1211, July 1999.
- [Fall & Vahdat, 2000] K. Fall and K. Varadhan. *ns notes and documents*. The VINT Project. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, February 2000. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>
- [Feeley *et al.*, 2004] M.J. Feeley, N.C. Hutchinson and S. Ray. Realistic mobility for mobile ad hoc network simulation. *in Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Vol. 3158, pp. 324-329, 2004.
- [Festag *et al.*, 2002] A. Festag, H. FÄuSSler, H. Hartenstein, A. Sarma, and R. Schmitz. Fleetnet : Bringing car-to-car communication into the realworld. *In World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS)*, 2002.
- [Festag & Hess, 2009] A. Festag, S. Hess. ETSI technical committee ITS : news from european standardization for intelligent transport systems (ITS)- [global communications newsletter]. *IEEE Communications Magazine*, pp. 1-4, June 2009.
- [Fiore & di Torino, 2006] M. Fiore, P. di Torino *Mobility Models in Inter-Vehicle Communications Literature*, Technical report, November 2006.
- [Fiore *et al.*, 2007] M. Fiore, J. Härri, F. Filali, and C. Bonnet, Vehicular Mobility Simulation for VANETs, *Proc. of the 40th IEEE Annual Simulation Symposium, ANSS'07*, pp. 301-309, March, 2007.
- [Fiore & Härri, 2008] M. Fiore and J. Härri. The Networking Shape of Vehicular Mobility. *Proc. ACM MobiHoc*, pp. 261-272, China, May 2008.
- [Franz *et al.*, 2001] W. Franz, R. Eberhardt, T. Luckenbach *FleetNet - Internet on the Road*, 8th World Congress on Intelligent Transport Systems, Sydney, Australia, 2001.
- [Giordano *et al.*, 2010] E. Giordano, R. Frank, G. Pau, and M. Gerla. Corner : a realistic urban propagation model for VANET *in The Seventh International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Kranjska Gora, Slovenia, February 2010.
- [Grau *et al.*, 2009] G.P. Grau, D. Pusceddu, S. Rea, O. Brickley, M. Koubek and D. Pesch. Characterisation of IEEE802.11p Radio Channel for Vehicle-2-Vehicle Communications

- using the CVIS Platform. *in Internal Report Centre for Adaptive Wireless Systems Cork Institute of Technology*, September 2009.
- [Han *et al.*, 2008] M. Han, Y. Lee, S. Moon, K. Jang, D. Lee. Evaluation of VoIP Quality over WiBro. *In Passive and Active Network Measurement*, Vol. 4979 , pp. 51-60, 2008.
- [Härri *et al.*, 2006] J. Härri, F. Filali, C. Bonnet. Performance comparison of AODV and OLSR in VANETs urban environments under realistic mobility patterns. *5th IFIP Mediterranean Ad-Hoc Networking Workshop*, Lipari, Italy, June 2006.
- [Härri *et al.*, 2009] J. Härri, F. Filali ; C. Bonnet. Mobility models for vehicular ad hoc networks : a survey and taxonomy. *in IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol 11 N°4, ISSN : 1553-877X, pp 19-41 , December 2009.
- [IEEE802.11b, 2007] IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications., 2007.
- [IEEE802.11p, 2006] IEEE P802.11pTM/D4.0 Draft 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 8 : Wireless Access in Vehicular Environments. 2006.
- [Jaap *et al.*, 2005] S. Jaap, M. Bechler, L. Wolf. Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks in City Traffic Scenarios. *Proc. 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST)*, Brest, France, June 2005.
- [Jardosh *et al.*, 2003] A. Jardosh, E.M. Belding-Royer, K.C. Almeroth and S. Suri. Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks. *Proc. ACM MOBICOM*, pp. 217-229, San Diego, September 2003.
- [Jiang *et al.*, 2006] D. Jiang, V. Taliwal, A. Meier, W. Holfelder, and R. Herrtwich. Design of 5.9 GHz DSRC-based Vehicular Safety Communication. *IEEE Wireless Communications magazine*, Vol. 13 No. 5, October 2006.
- [Johnson *et al.*, 2003] D. Johnson, D.A. Maltz and Y.C. Hu. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR) *IETF Internet Draft*, work in progress, draft-ietf-manet-dsr-09.txt, April 2003.
- [Joumaa *et al.*, 2007] C. Joumaa, A. Caminada and S. Lamrous, Mask Based Mobility Model A new mobility model with smooth trajectories. *Workshop on Spatial Stochastic Models in Wireless Networks (SpaSWiN)*, Limassol, Cyprus, April, 2007.

- [Joumaa *et al.*, 2008] C. Joumaa, A. Caminada and S. Lamrous. Mobility Simulation for the Evaluation of UMTS Power Control Algorithms. *Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pp. 1-5, Tangier Morocco, November, 2008.
- [Joumaa, 2010] C. Joumaa. *Spatiotemporal Characterization of Evolutive Data Analysis and Mobility Stochastic Modeling – Application for Urban Planning*. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, France. November 2010.
- [Karedal *et al.*, 2011] J. Karedal, N. Czink, A. Paier, F. Tufvesson and A. Molisch. Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 323-328, 2011.
- [Karnadi *et al.*, 2007] F. Karnadi, Z. Mo, and K.-C. Lan. Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET. *Proc. of IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC'07)*, March 2007.
- [Karp & Kung, 2000] B. Karp and H. T. Kung. Gpsr : greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *Proc. 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 243-254, 2000.
- [Khaled *et al.*, 2009] Y. Khaled, M. Tsukada, J. Santa, J. Choi and T. Ernst. A usage oriented analysis of vehicular networks : from technologies to applications. *Journal of Communications*, Academy Publisher, Special Issue on Challenges in Future Vehicular AD HOC Networks, vol. 4, no. 5, pp. 357-368, May 2009.
- [Ko & Vaidya, 2000] Y.B. Ko and N.H. Vaidya. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*, vol. 6, no. 4, pp. 307-321, 2000.
- [Kunisch & Pamp, 2008] J. Kunisch and J. Pamp. Wideband Car-to-Car Radio Channel Measurements and Model at 5.9 GHz. *in the IEEE 68th Vehicular Technology Conference : VTC2008-Fall*, pp. 1-5, Canada, September 2008.
- [Lochert *et al.*, 2003] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fussler, D. Hermann and M. Mauve. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 156-161, June 2003
- [Lott *et al.*, 2001] M. Lott, R. Halfmann, E. Schulz, M. Radimirsch. Medium Access and Radio Resource Management for Ad hoc Networks based on UTRA TDD. *Proc. 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp.76-86, USA, Oct. 2001.
- [Ma *et al.*, 2009] X. Ma, X. Chen, H.H. Refai. Performance and reliability of DSRC vehicular safety communication : a formal analysis. *EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking*, Vol. pp. 1-13, 2009.
- [Mahajan *et al.*, 2006] Mahajan, N. Potnis, K. Gopalan, and A.-I. A. Wang, *Urban mobility models for vanets*, In Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Next Generation Wireless Networks, December, 2006.

- [Mahajan *et al.*, 2007] Atulya Mahajan, Niranjana Potnis, Kartik Gopalan, and Andy Wang, Modeling vanet deployment in urban settings. *MSWiM '07 Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems* pp.151-158, Greece, October 2007.
- [Maihöfer, 2004] Maihöfer. A survey of geocast routing protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 6, No 2, 2004.
- [Mangharam *et al.*, 2006] R. Mangharam, D. Weller, R. Rajkumar, P. Mudalige and F. Bai. GrooveNet : A Hybrid Simulator for Vehicle-to-Vehicle Networks *Second International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications (V2VCOM)*, Jul 2006.
- [Marinoni & Kari, 2006] S. Marinoni and H.H. Kari. Ad Hoc Routing Protocol Performance in a Realistic Environment. *International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies*, pp. 96-96, April 2006.
- [Martinez1 *et al.*, 2009] F. J. Martinez1, C. K. Toh , J. C. Cano, C. T. Calafate and P. Manzoni. A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs). *In Wireless Communications and Mobile Computing*, pp 813-828, October 2009.
- [Martinez2 *et al.*, 2009] F. J. Martinez, C. K. Toh, J. C. Cano, C. T. Calafate, and P. Manzoni. Realistic radio propagation models (RPMs) for VANET simulations. *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Budapest, Hungary, April 2009.
- [Molisch *et al.*, 2009] A. Molisch, F. Tufvesson, J. Karedal and C. Mecklenbrauker. A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels *IEEE Wireless Communications*, Vol. 16, No. 6, pp. 12-22, 2009.
- [Nagel & Eichler, 2008] R. Nagel and S. Eichler Efficient and Realistic Mobility and Channel Modeling for VANET Scenarios using OMNet++ and INET-Framework. *OMNeT++ 2008 : Proceedings of the 1st International Workshop on OMNeT++* (hosted by SIMU-Tools 2008).
- [Naumov *et al.*, 2006] V. Naumov, R. Baumann, T. Gross. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces. *Proc. 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, May 2006.
- [Navda *et al.*, 2007] V. Navda, A.P. Subramanian, K. Dhanasekaran, A. Timm-Giel, and S.R. Das. MobiSteer : using steerable beam directional antenna for vehicular network access. *Proc. 5th international conference on Mobile systems, applications and services*, pp.192-205, 2007

- [Ni *et al.*, 1999] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen and J. Sheu. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, pp. 151-162, 1999.
- [Oishi *et al.*, 2006] J. Oishi, K. Asakura, and T. Watanabe. A Communication Model for Inter-vehicle Communication Simulation Systems Based on Properties of Urban Areas. *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 6, no. 10, pp. 213-219, October 2006.
- [PARAMICS, 2008] Quadstone Paramics, 2008. <http://www.paramicsonline.com/>
- [Perkins *et al.*, 2003] C. Perkins, E. Belding-Royer and S. Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing *RFC 3561*, July 2003.
- [Ramakrishnan *et al.*, 2011] B. Ramakrishnan, Dr. R. S. Rajesh, R. S. Shaji Analysis of Routing Protocols for Highway Model without Using Roadside Unit and Cluster. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 2, Issue 1, 2011.
- [Raney *et al.*, 2002] B. Raney, A. Voellmy, N. Cetin, M. Vrtic and K. Nagel. Towards a microscopic traffic simulation of all of switzerland. *In International Conference on Computational Science (1)*, pp 371-380, 2002.
- [Reichardt *et al.*, 2002] D. Reichardt, M. Miglietta, L. Moretti, P. Morsink and W.Schulz. CarTALK 2000- Safe and Comfortable Driving Based Upon Inter-Vehicle-Communication. *Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, Versailles, France 2002.
- [Schroth *et al.*, 2005] C. Schroth, F. Dötzer, T. Kosch, B. Ostermaier and M. Strassberger. Simulating the traffic effects of vehicle-to-vehicle messaging systems. *Proc. of 5th International Conference on ITS Telecommunications*, Brest, France, 2005.
- [Sichitiu & Kihl, 2008] M.L. Sichitiu and M. Kihl. Inter-vehicle communication systems : A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, pp. 88-105, 2008.
- [Soroush *et al.*, 2009] H. Soroush, N. Banerjee, A. Balasubramanian, M.D. Corner, B.N. Levine and B. Lynn *DOME : A Diverse Outdoor Mobile Testbed*, ACM HotPlanet'09 Krakow, Poland, 2009. <http://prisms.cs.umass.edu/dome/umassdieselnet>
- [Sun *et al.*, 2005] Q. Sun, S. Y. Tan, and K. C. Teh. Analytical formulae for path loss prediction in urban street grid microcellular environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 4, July 2005.
- [SUMO, 2007] SUMO - Simulation of Urban MObility, 2007. <http://sumo.sourceforge.net/>
- [TGp, 2006] Task Group p. IEEE P802.11p. Wireless access in vehicular environments (WAVE). *IEEE Computer Society*, 2006.
- [Toor *et al.*, 2008] Y. Toor, P. Mühlethaler, A. Laouiti and A.D.L. Fortelle. Vehicle ad hoc networks : Applications and related technical issues. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, pp.74-88, 2008.

- [Trieber *et al.*, 2000] M. Trieber, A. Hennecke and D. Helbing. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review*, E 62, Issue 2, August 2000.
- [UDel, 2009] UDel Models For Simulation of Urban Mobile Wireless Networks. <http://udelmodels.eecis.udel.edu/>
- [Uzcategui & Acosta-Marum, 2009] R. Uzcategui and G. Acosta-Marum. Wave : A tutorial. *IEEE Communications Magazine In Communications Magazine*, IEEE, Vol. 47, No. 5. pp. 126-133., May 2009.
- [Viriyasitavat *et al.*, 2011] W. Viriyasitavat, F. Bai and O.K. Tonguz. Dynamics of Network Connectivity in Urban Vehicular Networks *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 29, issue 3, pp. 515-533, March 2011.
- [VisSim, 2009] VISSIM - State-of-the-Art Multi-Modal Simulation. *ptv vision, 2009*, <http://www.ptvamerica.com/>
- [VSC-A, 2011] Vehicle Safety Communications - Applications (VSC-A). *Report DOT HS 811 492D*, Septembre 2011.
- [Vuyyuru *at al.*, 2006] R. Vuyyuru, K. Oguchi, C. Collier and E Koch. Automesh : Flexible Simulation Framework for Vehicular Communication. *Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking & Services*, pp. 1-6, 2006.
- [Wang, 2005] S.Y. Wang The Effects of Wireless Transmission Range on Path Lifetime in Vehicle-Formed Mobile Ad Hoc Networks on Highways *Proc. IEEE International Conference on Communication (ICC)*, pp. 3177-3181, May, 2005.
- [Wu *et al.*, 2004] H. Wu, R. Fujimoto, R. Guensler, and M. Hunter, MDDV : Mobility Centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks, *Proc. of 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, October 2004.
- [Yan *et al.*, 2009] G. Yan, K. Ibrahim, M. C. Weigle. Vehicular Network Simulators. *in : S. Olariu, M. C. Weigle (Eds.), Vehicular Networks : From Theory to Practice, Chapman and Hall/CRC*, 2009.
- [Yang *et al.*, 2004] X. Yang, J. Liu, F. Zhao, and N. H. Vaidya. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning. *Proc. 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services (MOBIQUITOUS'04)*, pp. 114123, August 2004.
- [Yin *et al.*, 2004] J. Yin, T. ElBatt, G.Yeung, B. Ryu, and S. Habermas. Performance Evaluation of Safety Applications over DSRC Vehicular Ad Hoc Networks. *Proc. of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, October 2004.

- [Zeadally *et al.*, 2010] S. Zeadally, R. Hunt, Y.S. Chen, A. Irwin and A. Hassan. Vehicular ad hoc networks (VANETS) : status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, pp. 1-25, Decembre 2010.
- [Zeng *et al.*, 1998] X. Zeng, R. Bagrodia, and M. Gerla, *GloMoSim : A Library for Parallel Simulation of Large-Scale Wireless Networks*. Proc. of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS '98), pp 154 ?161. IEEE Computer Society, May 1998.

Résumé :

La difficulté, aussi bien économique que logistique, de la mise en œuvre réelle des réseaux véhiculaires fait de la simulation le moyen le plus largement utilisé pour la conception et l'évaluation des solutions proposées. Cependant, la validité des résultats de simulation dépend fortement de la capacité des modèles utilisés à reproduire le plus fidèlement possible les situations réelles. Deux aspects sont essentiellement importants dans les VANET : la mobilité des véhicules et la propagation des ondes radio. Nous proposons dans cette thèse un nouveau modèle de mobilité et un nouveau modèle de propagation d'ondes radio pour réseaux de véhicules en environnement urbain et suburbain. Pour définir des schémas réalistes, ces deux modèles se basent sur des données statiques et dynamiques réelles décrivant les caractéristiques topographiques et socio-économiques de l'environnement. Ces données concernent particulièrement la distribution spatio-temporelle des véhicules et les infrastructures présentes dans l'environnement. Trois cas d'études sont présentés dans la thèse pour la validation des modèles développés ; un environnement théorique, urbain ou suburbain, défini par l'utilisateur, notamment la grille de Manhattan très utilisée, et deux environnements réels qui représentent des agglomérations de taille moyenne. Une autre contribution de cette thèse est l'étude de la connectivité radio et des performances des protocoles de routage dans les VANET. A partir de graphes dynamiques de connexions représentant la variation des liens radio entre véhicules en déplacement, nous avons analysé et déterminé les propriétés de la topologie des liaisons radio des réseaux véhiculaires. Pour étudier les protocoles de routage, nous avons utilisé le modèle de mobilité et le modèle de propagation radio que nous avons développés en association avec le simulateur de réseaux ns-2. Nous avons comparé les performances des protocoles de routage les plus répandus et identifié les mécanismes de routage les plus adaptés aux réseaux véhiculaires.

Abstract:

The difficulty, both economic and logistical, of a real implementation of vehicular networks makes the simulation widely used to conceive and assess the proposed solutions. The validity of simulation results depends strongly on the ability of the models to reproduce as faithfully as possible the real situations. Two aspects are mainly important in the VANET: the simulation of vehicles mobility and radio wave propagation. We propose in this thesis a new mobility model and a new radio propagation model for vehicular networks in urban and suburban environment. To be realistic, these two models are based on real static and dynamic data describing the topographic and socioeconomic characteristics of the environment. These data concern particularly the spatiotemporal vehicles distribution and the description of the infrastructures present in the environment. Three case studies are presented in the thesis to validate the models, a theoretical user-defined urban or suburban environment (the Manhattan grid very often used) and two real environments from mean size cities. Another contribution of this thesis is the study of radio connectivity and performance of routing protocols in the VANET. From dynamic graphs representing the variation of the radio links between vehicles in motion, we have analyzed and determined the topology properties of vehicular networks. To study routing protocols, we used the mobility model and the radio propagation model in association with the network simulator ns-2. We have compared the performance of the widespread routing protocols and identified the most adapted routing mechanisms to vehicular networks.

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features a blue horizontal bar on the left, followed by the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, stylized font.

■ École doctorale SPIM - Université de Technologie Belfort-Montbéliard

F - 90010 Belfort Cedex ■ tél. +33 (0)3 84 58 31 39

■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

