

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
UFR des sciences fondamentales et appliquées
XLIM-SIC
(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

École doctorale : Sciences et ingénierie pour l'information, mathématiques - S2IM
Secteur de recherche : Génie informatique, automatique et traitement du signal

Présentée par :
Jonathan Ledy

Stratégie d'adaptation de liens sur canaux radios dynamiques pour les communications entre véhicules - Optimisation de la qualité de service

Directeur(s) de Thèse :
Rodolphe Vauzelle, Anne-Marie Poussard

Soutenue le 19 décembre 2012 devant le jury

Jury :

Président	Marc Hélier	Professeur des Universités, Université de Paris 6
Rapporteur	Michel Mission	Professeur des Universités, Université de Clermont-Ferrand 1
Rapporteur	Kosai Raouf	Professeur des Universités, Université du Mans
Membre	Rodolphe Vauzelle	Professeur des Universités, Université de Poitiers
Membre	Anne-Marie Poussard	Maître de conférences, Université de Poitiers
Membre	Hervé Boeglen	Maître de conférences, Université de Mulhouse
Membre	Benoît Hilt	Maître de conférences, Université de Mulhouse
Membre	Xavier Bunlon	Ingénieur, Renault SA

Pour citer cette thèse :

Jonathan Ledy. *Stratégie d'adaptation de liens sur canaux radios dynamiques pour les communications entre véhicules - Optimisation de la qualité de service* [En ligne]. Thèse Génie informatique, automatique et traitement du signal. Poitiers : Université de Poitiers, 2012. Disponible sur Internet <<http://theses.univ-poitiers.fr>>

THESE

pour l'obtention du Grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)
(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

Ecole Doctorale : **Sciences et Ingénierie pour l'Information et Mathématiques**

Secteur de Recherche : **Génie informatique, automatique et traitement du signal**

Présentée par :

LEDY Jonathan

Stratégie d'adaptation de liens sur canaux radios dynamiques pour les communications entre véhicules - Optimisation de la Qualité de Service

Directeur de Thèse : M. Rodolphe VAUZELLE

Soutenue le 19 décembre 2012 devant la Commission d'Examen composée de

Pr. Michel MISSON

Pr. Kosai RAOOF

Marc HELIER

Xavier BUNLON

Anne-Marie POUSSARD

Benoît HILT

Hervé BOEGLIN

Rodolphe VAUZELLE

Laboratoire LIMOS

Laboratoire LAUM

Laboratoire L2E

Chef de projet R&D Renault

Laboratoire XLIM-SIC

Laboratoire MIPS

Laboratoire MIPS

Laboratoire XLIM-SIC

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Co-encadrante

Co-encadrant

Co-encadrant

Directeur de thèse

Remerciements

Les travaux réalisés durant cette thèse ont été réalisés au laboratoire XLIM-SIC de Poitiers, en collaboration avec le laboratoire MIPS-GRTC de Colmar. Je tiens à remercier tout particulièrement l'équipe qui m'a encadré, aidé et soutenu tout au long de ce parcours, en commençant par Monsieur Rodolphe Vauzelle, Professeur de l'Université de Poitiers, qui a brillamment dirigé mes travaux de thèse.

Un grand merci également à Madame Anne-Marie Poussard, Maître de conférence de l'université de Poitiers, Monsieur Benoît Hilt, Maître de conférence de l'Université de Haute-Alsace, et Monsieur Hervé Boeglen, Maître de conférence de l'université de Haute-alsace, pour m'avoir co-encadré durant ces années. Cette thèse n'a pu exister que grâce aux efforts combinés de l'ensemble des membres de cette équipe, et j'en garde un souvenir mémorable.

Je tiens également à remercier le Docteur Tiguiane Yelemou, le Docteur Wassim Hamidouche ainsi que Mahamadi Savadogo pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant ma thèse. Rien n'aurait été possible sans vos efforts combinés, merci.

Et puis finalement, ces années passées à Poitiers n'auraient pas été aussi agréables sans l'ensemble des membres du laboratoire XLIM-SIC. Un grand merci à Toto et Marco pour tout ce que vous avez fait pour moi, salut ça va ? Vive SheepBox. Merci à Alexandre, Boris, Romuald, Sébastien, Bruno, Gaëlle et toute la bande de la coinche du midi, capot à pique ! Merci à Eric (dame D6), Pierre (Qui a renversé du café ?) et Samuel (Choucrouterie Claude) pour tous ces bons moments autour du plateau, échec et mat ! Que dire enfin de mes fidèles acolytes : Raphaelo, Donatelabo et Michaelangelo. Merci les gars, c'était vraiment top et un pur régal. Merci à tous.

Merci aussi à mes chers collègues de bureau et amis, en commençant par Bader bien sûr (t'es juste à côté et tu me vois pas écrire!), et sans oublier Siham et Tiguiane. Et puis à tous ceux sans qui la vie au labo n'aurait pas eu la même saveur : Clency, Pierre & Yannis, Alexandre & Audrey, Noël, Aurélie, Virginie et toute la joyeuse bande que je retrouve toujours avec plaisir à la cafet, ou dans les couloirs. Un grand merci à Toto et Marco pour tout ce que vous avez fait pour moi, je t'aime Elsa ! Vive SmallTown. Et merci à la Princesse Kaoutar, au président Riad, ainsi qu'à Iana et Syntyche pour l'A10, je suis très fier de vous !

Un grand merci à Toto et Marco pour tout ce que vous avez fait pour moi. Merci aussi à Benji, Carlos, Julie, Aude, Marion et tous ceux et celles qui ont contribué à faire de ces années, de très bons souvenirs. Merci aussi à Aurore car c'est mes remerciements et je fais ce que je veux (Pantoflarz).

Et puis merci à ceux qui sont devenus bien plus que de simples collègues ou amis. Maman Framboise, garde ton caractère et tes idéaux, ne change rien, c'est comme ça qu'on t'aime (Ami entends-tu le vol noir des corbeaux sur nos plaines...). Mme Lice et Mr R, vous n'ont plus ne changez rien, je vous aime comme ça. Le prince Ali, qui va et vient, allez viens, tu vas voir tout ce qu'on peut faire ! Comme la fin de monde semble avoir été évitée de justesse, je remercie également le Dr Jund de sa clémence pour nous avoir tous épargnés... pour le moment. Et Leo le meilleur, aussi bien humainement que scientifiquement, et Emmie qui n'aime pas trop qu'on appelle les chiens comme ça, gentille Emmie, bien sage.

Et puis j'aimerais finir en vous rappelant que, à la CAFET :

Pour éviter d'avoir des pénalités dues à un compte passant en dessous de zéro, je vous conseille de le réapprovisionner.

Petit rappel des règles en vigueur:

- > Café, thé et tisanes à volonté.
 - > Consommation dans le frigo et l'armoire: une croix (tarif unique!)
 - > Prix de la croix : 0.5 EUR
 - > Prix de la croix (aggio*) : 0.6 EUR
 - > Cotisation : 10 Euros cette année !
 - > Si vous accueillez quelqu'un au labo, pensez à l'informer du fonctionnement de la CAFET ou à l'envoyer vers quelqu'un qui puisse le renseigner.
- * croix comptées sans être repassé au-dessus de zéro avant les comptes.

Pour le bien de tous, merci de respecter ces règles lors de votre passage à la CAFET.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 - Simulation de réseaux VANETs	
Introduction.....	6
1.1 Les réseaux sans fil.....	7
1.1.1 Les réseaux sans fil avec infrastructure.....	7
Les réseaux cellulaires.....	7
Les réseaux Meshs.....	8
1.1.2 Les réseaux sans fil sans infrastructure.....	8
1.1.3 Le modèle OSI.....	10
1.2 Couches basses pour une simulation VANETs.....	12
1.2.1 La couche physique.....	12
1.2.1.1 Le canal de transmission.....	12
SISO.....	12
MIMO.....	15
1.2.1.1 Les communications numériques.....	16
Les modulations numériques.....	16
Le codage canal.....	17
1.2.2 La couche liaison.....	18
1.2.3 La couche réseau.....	20
Protocoles pro-actifs.....	21
Protocoles réactifs.....	22
Protocoles hybrides.....	23
Protocoles géographiques.....	24
1.1 Modélisation de la mobilité.....	25
1.2 Les simulateurs pour les réseaux VANETs.....	27
1.2.1 Simulateurs de réseaux Ad Hoc.....	27
NS-2.....	27
NS-3.....	29
GlomoSim.....	30
Omnnet++.....	31
1.2.2 Simulateurs de mobilité.....	32
SUMO.....	32
MOVE.....	32
VanetMobiSim.....	33
1.2.3 Les simulateurs intégrés.....	33
TraNS.....	34
NCTUns.....	34
1.3 Vers des simulations VANETs réalistes.....	35
Qualité de service et approche cross-layer.....	35
Positionnement scientifique de la thèse.....	36
Positionnement technique de la thèse.....	37
Conclusion.....	39
Bibliographie.....	40
Chapitre 2 - Un modèle de couche physique semi-déterministe pour les VANETs	
Introduction.....	46
2.1 Modèles de canaux.....	47
2.1.1 Modèles empiriques.....	48
2.1.2 Modèles déterministes.....	49
2.1.2.1 Modèles exacts ou à formulation rigoureuse.....	50
2.1.2.2 Modèles asymptotiques en fréquence.....	50
Principes des modèles asymptotiques.....	50
Un exemple : le simulateur de tracé de rayons CRT.....	51
2.1.3 Modèles statistiques.....	53
2.1.3.1 Modèles à distributions statistiques.....	54
Distribution statistique de Rayleigh.....	54
Distribution statistique de Rice.....	54
Distribution statistique Log-normal.....	54

Distribution statistique de Nakagami.....	55
2.1.3.2 Modèles géométriques.....	55
Modèles à un et deux anneaux.....	55
Modèles électromagnétiques.....	56
2.1.4 Conclusion.....	58
2.2 Un modèle de couche physique semi-déterministe.....	59
2.2.1 Le modèle de propagation semi-déterministe UM-CRT.....	60
2.2.2 Une couche physique semi-déterministe.....	62
2.2.3 Évaluation de la couche physique semi-déterministe.....	63
2.3 Analyse de performances de la plate-forme VANET.....	68
2.3.1 La plate-forme de simulation VANETs.....	68
2.3.2 Les paramètres de simulations.....	70
2.3.3 Étude comparative globale.....	71
2.3.4 Étude comparative précise.....	75
2.3.5 Les limites du modèle.....	78
Conclusion.....	79
Bibliographie.....	80
Chapitre 3 - Optimisation de la qualité de service par une approche routage et cross-layer	
Introduction.....	84
3.1 La qualité de service.....	86
3.2 Méthodologie de comparaison de protocoles de routage en environnement réaliste.....	88
3.2.1 Environnement de simulation.....	88
3.2.2 Présentation des résultats.....	89
3.3 Évaluation de protocoles topologiques.....	90
3.3.1 Descriptions de AODV, OLSR et ZRP.....	90
AODV.....	91
OLSR.....	92
ZRP.....	92
3.3.2 Performances de AODV, OLSR et ZRP dans un environnement réaliste.....	93
Performances globales.....	94
Résultats détaillés.....	96
Conclusions.....	99
3.4 Évaluation de protocoles réactifs.....	101
3.4.1 Description de AOMDV et DYMO.....	102
AOMDV.....	102
DYMO.....	103
3.4.2 Performances de AODV, AOMDV et DYMO dans un environnement réaliste.....	103
Performances globales.....	104
Résultats détaillés.....	105
Synthèses et conclusions.....	107
3.5 Adaptation de AODV au contexte VANET.....	109
3.5.1 Approche Tuning.....	109
AODV - Hello Messages.....	110
AODV - Timers.....	111
3.5.2 Performances de l'approche Tuning.....	113
3.5.3 Approche cross-layer.....	114
AODV – TEB.....	115
AODV – Size.....	116
3.5.4 Performances de l'approche cross-layer.....	117
3.6 Optimisation des liens physiques - Cas du MIMO.....	120
AODV Timers – configuration MIMO.....	120
DYMO – configuration MIMO.....	121
Performances globales de l'optimisation MIMO.....	121
Résultats détaillés.....	123
Synthèses et conclusions.....	124
Conclusion.....	125
Bibliographie.....	127
Conclusion générale.....	130

Introduction générale

La société contemporaine est influencée par deux technologies majeures dans le domaine des télécommunications : Internet et les réseaux mobiles. Ces deux technologies associées permettent un accès ubiquitaire¹ à Internet. Les technologies de communication sans fil peuvent être classifiées en deux grandes catégories : les réseaux cellulaires et les réseaux Wifi. Les réseaux Wifi se déclinent en deux grands modes de fonctionnement. Le mode architecture qui dispose d'un point de coordination, et le mode Ad Hoc qui est un mode spontané sans coordination. Quand en mode Ad Hoc les nœuds sont mobiles, on parle de MANETs (*Mobile Ad hoc NETWORKS*). Les VANETs (*Vehicular Ad hoc NETWORKS*) sont une sous-classe des réseaux Ad Hoc dans lesquels les émetteurs et récepteurs sont des véhicules. Ce travail de thèse, au sein du laboratoire XLIM-SIC de Poitiers se place dans le contexte des VANETs. Il a été réalisé grâce à une bourse de thèse de la région Poitou-Charentes, dans le cadre du plan « croissance verte » de la Région Poitou-Charentes, portant sur l'usage des véhicules électriques dans des environnements urbains et péri-urbains, et mené en collaboration avec le laboratoire MIPS de l'Université de Haute Alsace.

Les communications dans les VANETs peuvent elles mêmes être divisées en trois catégories : véhicule-vers-véhicule (V2V), infrastructure-vers-véhicule (I2V) et véhicule-vers-infrastructure (V2I). Ces communications peuvent être utilisées pour différentes applications regroupées sous le terme général Systèmes de Transport Intelligents ou Intelligent Transport Systems (ITS). Ces applications, qu'elles soient dévolues à la sécurité des véhicules ou de leurs passagers, ou à leur divertissement, nécessitent une certaine qualité du réseau qui va prendre en charge leurs données, on parle alors de communications robustes et de qualité de service. Ces exigences contrastent avec les réseaux de véhicules qui, de par la forte mobilité de leurs nœuds ainsi que leur environnement d'évolution, subissent de fréquentes pertes de connectivité.

Afin de donner une impulsion forte au développement des technologies VANETs et de ses applications, l'Union Européenne a publié dans son journal officiel la directive, datée du 7 juillet 2010, qui demande que tous les véhicules sur la route soient capables de communiquer entre eux dans un futur très proche: « *Concerning the deployment of ITS in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport, the commission intends to adopt specifications for one or more of the priority actions by 27 February 2013.* »

La problématique de l'amélioration des performances des VANETs passe par la résolution du problème de versatilité des liens sans fil cités ci-dessus. L'expérimentation étant très coûteuse en moyen et en hommes, la simulation est l'alternative la plus souvent utilisée pour étudier les problèmes des VANETs et pour pouvoir y apporter des solutions. Dans un domaine aux contraintes aussi spécifiques et changeantes, le réalisme de l'environnement de simulation devient un enjeu majeur pour la production de résultats fiables. Le réalisme dans les VANETs nécessite la mise en œuvre de modèles de mobilité adaptés aux véhicules, et de modèles de couche physique détaillés (modèles de canaux et chaîne de transmission numérique) [1][2].

1 Partout et à tout moment

L'objectif de cette thèse est double : développer une plate-forme de simulation VANETs, puis s'en servir afin d'optimiser les performances des VANETs à l'aide de mécanismes de routage. Ce travail propose donc deux contributions distinctes qui se situent chacune dans deux domaines différents. La première contribution est l'élaboration d'un modèle de couche physique réaliste semi-déterministe intégré à un simulateur de réseaux Ad Hoc. Il permet de former une plate-forme de simulation réaliste pour les VANETs. La deuxième contribution est une étude d'optimisation de plusieurs protocoles de routage afin d'en améliorer les performances dans un cadre VANETs.

Pour mettre en place une plate-forme réaliste de simulation pour les VANETs, nous sommes employés à créer un modèle de propagation réaliste que nous avons intégré au simulateur de réseaux NS-2 qui est parmi les plus utilisés en recherche. En effet, bien que l'ensemble des phénomènes de la propagation du canal soient connus, la modélisation du canal de propagation dédiée aux simulateurs de réseaux VANETs reste un vaste domaine de recherche qui, de plus, est très actif. Notre contribution, UM-CRT, est un modèle de propagation semi-déterministe composé d'un simulateur à tracé de rayons et d'un modèle de propagation statistique géométrique. Ce couplage lui permet d'atteindre un réalisme équivalent à un outil déterministe, tout en réduisant significativement le temps de calcul. Ce modèle a ensuite été combiné aux normes 802.11p et 802.11n pour former une couche physique réaliste SISO (Simple Input Simple Output) ou MIMO (Multiple Input Multiple Output), cet ensemble étant intégré dans le simulateur NS-2.

Pour optimiser les performances des communications multi-sauts dans les VANETs, nous avons utilisé une heuristique d'évaluation de protocoles et de sélection du plus performant en fonction des métriques d'évaluation. C'est ainsi que nous avons tout d'abord sélectionné la famille des protocoles topologiques, puis les protocoles réactifs. Dans cette famille, nous avons finalement sélectionné le protocole AODV (*Ad hoc On demand Distance Vector*) auquel nous avons apporté des optimisations de types Tuning et Cross-layer, ainsi que le protocole DYMO. Nos conclusions à propos de ces optimisations de protocoles nous ont ensuite conduits à les évaluer avec une optimisation qui ne porte pas sur les protocoles mais directement sur la couche physique par la mise en œuvre du MIMO. L'ensemble de ces propositions a, bien entendu, été testé dans un contexte réaliste à l'aide de notre plate-forme de simulation réaliste dédiée aux VANETs.

Cette thèse s'articule en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les différents types de réseaux sans fil, depuis les réseaux avec infrastructure jusqu'aux réseaux véhiculaires. Il explicite ensuite l'ensemble des éléments nécessaires à la simulation des VANETs et donne des exemples des différents mécanismes utilisés dans les couches basses du modèle OSI. Il souligne la nécessité d'utiliser conjointement un modèle de couche physique réaliste, au sein d'un simulateur de réseau, avec un modèle de mobilité également réaliste. Les principes de la modélisation de la mobilité sont exposés. Puis, différents simulateurs de réseaux et de mobilité sont détaillés : les simulateurs intégrés qui associent dans la même entité la mobilité et le réseau, et les simulateurs indépendants qui séparent les deux outils. La dernière partie du chapitre 1 indique le positionnement scientifique et technique de la thèse et présente les méthodes et outils choisis pour répondre à la problématique.

Le chapitre deux présente notre première contribution : un modèle de couche physique semi-déterministe pour les VANETs. Pour expliquer son fonctionnement, une étude des modèles de propagation existants est tout d'abord réalisée. On distingue plusieurs catégories de modèles : les modèles empiriques, les modèles déterministes et les modèles statistiques. Ensuite, nous présentons notre contribution qui se compose d'un modèle de propagation semi-déterministe appelé UM-CRT intégré dans une couche physique dédiée aux VANETs. Le principe de UM-CRT est de combiner les avantages d'un simulateur déterministe à tracé de rayons, CRT (*Communication Ray Tracer*), avec un modèle statistique SCME-UM (*Spatial Channel Model Extended – Urban Microcell*) pour associer réalisme et faible temps de calcul. Puis, la méthode utilisée pour inclure UM-CRT dans le simulateur NS-2 est présentée. Une fois l'outil de simulation mis en place, la validité et la précision de la plate-forme de simulation sont montrées grâce à un comparatif avec le simulateur déterministe à tracé de rayons.

Le troisième et dernier chapitre traite de l'optimisation des communications dans les réseaux véhiculaires avec la plate-forme de simulation réaliste précédemment élaborée. Il présente une étude comparative de différents protocoles, tout en soulignant les avantages et les limitations de chaque type de protocole. Ensuite il définit la notion de qualité de service, ou *Quality of Service* (QoS). La méthodologie, consistant à comparer les protocoles entre eux selon trois mesures (taux de paquets reçus, taux de paquets de routage et temps de transmission) et à choisir le plus performant, est explicitée. La partie suivante du chapitre évalue les protocoles topologiques, dont les protocoles réactifs se sont montrés les plus performants. C'est le protocole AODV, issu de la famille des protocoles réactifs, qui donne les meilleurs résultats mais ne fournit pas une qualité de service suffisante pour effectuer des communications VANETs dans de bonnes conditions. Deux méthodes d'optimisation sont alors testées : les techniques *tuning* et *cross-layer*. La première consiste à adapter des paramètres du protocole au contexte VANETs, et la seconde consiste à intégrer des métriques provenant d'une autre couche de modèle OSI (la couche physique). Enfin, l'apport du canal MIMO pour les protocoles les plus performants est expérimenté afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

Une conclusion et quelques perspectives viennent terminer cette thèse.

Chapitre 1 - Simulation de réseaux VANETs

Introduction

Dans le vaste domaine des réseaux sans fil, ce chapitre introduit les éléments globaux nécessaires à l'ensemble de la thèse. Il dresse un panorama non exhaustif de systèmes, de modèles et de simulateurs. Il est structuré en quatre sections. La première définit les réseaux sans fil avec et sans infrastructure pour évoluer progressivement vers les réseaux VANETs qui constituent le contexte d'étude de cette thèse. La deuxième section présente les composants essentiels permettant de réaliser une simulation VANETs. La troisième expose différents outils de simulations VANETs existants. La simulation de réseau VANET, du fait de la mobilité des nœuds, requiert l'utilisation d'un simulateur de mobilité et d'un simulateur de réseau, afin d'obtenir des résultats aussi fidèles que possibles à la réalité. Ces deux composants permettant la simulation de réseau VANETs peuvent être intégrés ou pas. La quatrième section positionne les travaux de thèse par rapport à l'ensemble de ces éléments.

1.1 Les réseaux sans fil

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes catégories de réseaux sans fil, depuis les réseaux sans fil cellulaires jusqu'aux réseaux véhiculaires au sein des réseaux Ad Hoc.

1.1.1 Les réseaux sans fil avec infrastructure

Cette section montre l'évolution suivie par les réseaux sans fil pour sans cesse s'adapter aux besoins de l'homme, tout en prenant en compte les contraintes technologiques liées à ces réseaux. Le changement des moyens de communication, depuis la voix jusqu'aux services multimédias, a entraîné une mutation des techniques utilisées dans les réseaux sans fil. Ces différentes technologies sont présentées.

Les réseaux cellulaires

Dans un réseau sans fil cellulaire [3], au sein d'une cellule, il existe une station de base, et des terminaux mobiles qui échangent avec cette base plutôt que directement entre eux. En fonction de la technologie (2G, 3G ou 4G), elle peut servir à relier des équipements entre eux, mais peut aussi être reliée à Internet via un réseau filaire. La station de base d'une cellule est reliée à ses homologues des autres cellules voisines afin d'assurer une couverture globale d'un territoire. Il s'agit du principe des réseaux cellulaires. Soulignons que cela suppose une planification rigoureuse des fréquences afin d'éviter les risques d'interférences entre cellules. Une illustration est proposée sur la *figure 1.1a*.

Les systèmes cellulaires reposent sur la fonctionnalité de *Handover*, à savoir, un mécanisme permettant d'assurer la continuité d'une communication lors des changements de cellule dans un contexte de mobilité. Le passage de la couverture radio d'une station de base à une autre est ainsi transparent. Un deuxième mécanisme vient compléter le *Handover* pour une efficacité optimum : il s'agit du *roaming*. Celui-ci permet à un mobile de pouvoir appeler ou être appelé *via* le réseau radio mobile de plusieurs opérateurs et pas uniquement du sien, et ceci, quelle que soit la cellule dans laquelle le mobile se trouve. Le *roaming* repose sur une localisation de chaque terminal mobile.

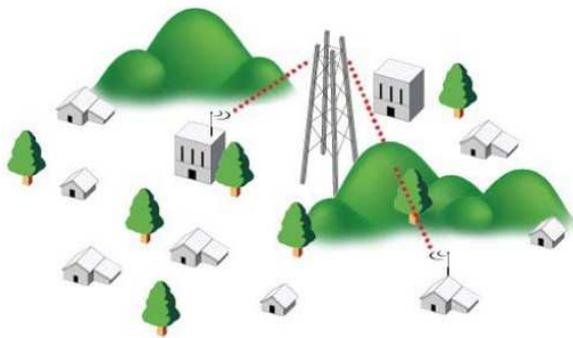


Figure 1.1a : Communication au sein d'une cellule.

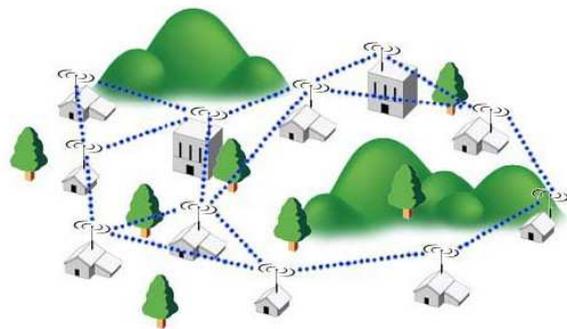


Figure 1.1b : Architecture sans point d'accès.

Les réseaux Meshs

L'architecture de réseaux dite Mesh (signifiant "maille" ou "filet") est connue depuis longtemps : il s'agit d'une topologie où chaque point du réseau est relié à tous les autres ou à certains de ses voisins. Mais elle prend tout son intérêt avec la technologie WiFi. Dans une structure traditionnelle WiFi, en particulier lors de l'accès à un hot-spot (un point d'accès à Internet sans fil), on a en général un point d'accès (Access Point) et des équipements qui échangent avec ce point d'accès, plutôt que directement entre eux. Cette configuration présente plusieurs inconvénients, au premier rang desquels son caractère par essence centralisé (cf. *figure 1.1a*). En clair, si le point d'accès cesse de fonctionner, c'est l'ensemble du réseau, ou en tout cas l'intégralité de la branche raccordée au point d'accès, qui tombe. L'ambition du réseau Mesh est de supprimer le réseau d'interconnexion entre les points d'accès. Un réseau Mesh implique simplement que les éléments du réseau soient connectés les uns aux autres et plus exactement, en pratique, à leurs plus proches voisins (cf. *figure 1.1b*).

1.1.2 Les réseaux sans fil sans infrastructure

Le principe des réseaux Ad Hoc consiste à supprimer les points d'accès, ou plus exactement à transformer tous les équipements en points d'accès. Ils sont ainsi souvent reliés à la terminologie « réseau sans infrastructure fixe ». Si ces équipements sont mobiles, on parlera de réseau mobile Ad Hoc (Mobile Ad Hoc Networks). Et si ces équipements sont des véhicules, on parlera de réseau véhiculaire Ad Hoc (Vehicular Ad Hoc Network).

Les réseaux Ad Hoc

Les réseaux Ad Hoc [4] sont des réseaux sans infrastructure, auto-configurables et auto-adaptatifs. Le concept de réseau Ad Hoc est souvent utilisé dans un réseau WiFi et permet de faire jouer à chaque membre du réseau le rôle de récepteur, d'émetteur et de routeur pour ses voisins. Il n'y a plus de "point d'accès" privilégié et encore moins unique, mais tous les points du réseau peuvent jouer ce rôle. On notera qu'une confusion fréquente consiste à assimiler les réseaux Mesh aux réseaux Ad Hoc, et les deux avec la technologie WiFi. Le concept de réseau Ad Hoc se caractérise par le fait que chaque élément rejoint le réseau de façon immédiate. Il s'agit ici du caractère auto-adaptatif et auto-configurable des réseaux Ad Hoc. En général, l'élément est identifié par son adresse réseau qui est reconnue spontanément.

On connaît les limites du WiFi, notamment en matière d'obstacles : s'il existe un mur entre l'ordinateur et le point d'accès correspondant au hot-spot, la portée du réseau diminue considérablement et il est parfois difficile, voire impossible, de capter le signal. Les architectures Mesh et Ad Hoc, lorsqu'elles utilisent de nombreux équipements, contournent ce problème, au sens propre comme au figuré : l'accès s'établit de proche en proche, *via* les autres membres du réseau qui font office de relais. On peut ainsi concevoir des réseaux auto-organisés, capables de s'auto-réparer et pouvant mélanger des matériels hétérogènes. Le frein à l'établissement du réseau (ou d'une connexion sans fil à Internet) n'est donc plus la présence d'obstacles, mais l'isolement. De ce point de vue, cette architecture paraît bien adaptée à la création de réseaux sans fil en agglomération urbaine notamment.

En conclusion, l'architecture Ad Hoc augmente la fiabilité du réseau, tout en augmentant sa souplesse, sa capacité d'adaptation, et son "intelligence". Toutefois, il soulève évidemment certaines difficultés de mise en oeuvre.

Les réseaux MANETs

Les réseaux MANETs (Mobile Ad Hoc Networks) sont des réseaux Ad Hoc avec des noeuds mobiles interconnectés au moyen de communications radio. Ces réseaux sont d'une nature totalement dynamique. Chaque nœud doit être capable de s'auto-configurer sans recours à aucune gestion centralisée, ni aucune infrastructure préalablement déployée. Les MANETs suscitent un grand intérêt de la part des chercheurs, qu'ils soient du milieu industriel ou académique. Ces réseaux qui étaient initialement proposés pour une utilisation dans le domaine militaire, montrent aujourd'hui de plus en plus de potentiel pour les applications civiles. Le principal avantage de ce type de réseaux est qu'il peut être déployé rapidement, n'importe où et à tout moment, car il ne nécessite aucune infrastructure préexistante et centralisée.

Les réseaux VANETs

Les réseaux VANETs (Vehicular Ad Hoc Network) représentent une sous-classe des réseaux MANETs. Les VANETs sont des réseaux auto-configurables qui reposent sur l'interconnexion de véhicules communicants (cf. *figure 1.2*).

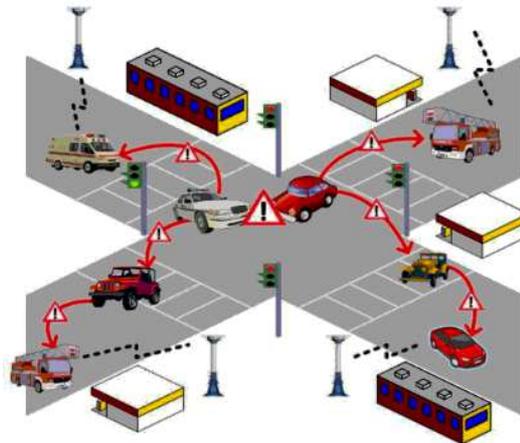


Figure 1.2 : Exemple d'un réseau VANET.

À cause de la vitesse des véhicules qui peut être élevée, la topologie des VANETs peut changer très rapidement, elle est donc potentiellement moins stable comparativement aux MANETs. Par la spécificité de leurs caractéristiques et leurs terrains d'applications, les réseaux VANETs nécessitent une attention particulière. Leurs exigences en termes de performances techniques sont plus importantes que celles des autres types de réseaux.

La mise en œuvre de réseaux VANETs demande des investissements importants et se révèle fastidieuse. L'expérimentation, bien que nécessaire, n'est malheureusement pas une solution qui se suffit à elle-même et l'étude par simulation est une nécessité.

1.1.3 Le modèle OSI

Le modèle OSI définit l'interface commune à tous les terminaux au sein d'un réseau. Pour faciliter l'interconnexion des systèmes issus de différents constructeurs, l'organisme ISO propose un découpage fonctionnel de l'ensemble du processus communicant d'un réseau. Ce découpage fonctionnel est décrit dans le modèle OSI avec une structuration en 7 couches. Le synoptique du modèle proposé dans la référence [5] est représenté sur la *figure 1.3*.

Couche	Fonctionnalité
7	Application
6	Présentation
5	Session
4	Transport
3	Réseau
2	Liaison
1	Matériel

Figure 1.3 : Structure en couches du modèle OSI [3].

Le détail du modèle est également explicité dans la référence [5]. La couche application offre à l'utilisateur l'accès aux différentes applications du réseau. C'est au niveau de cette couche que l'information est traitée avant son acheminement par les autres couches vers la destination. La couche « présentation » traduit l'information à transmettre à travers le réseau en un langage commun. L'établissement des communications de bout en bout, c'est-à-dire entre une source et une destination, est géré par la couche « session ». La couche « transport » assure la fiabilité et la régulation des échanges de paquets entre la source et la destination. La couche « réseau » oriente et achemine les paquets de la source jusqu'à la destination. Les protocoles de routage interviennent à ce niveau. La couche « liaison » est composée de deux sous-couches de données, LLC (Link Layer control) et MAC (Medium Access Control), qui assurent l'échange et la fiabilité de réception des trames entre deux terminaux voisins (émetteur-récepteur) communiquant à travers un lien direct. Enfin, la couche « physique », à travers des techniques de traitement du signal, permet d'adapter l'information à transmettre au canal radio.

Dans cette modélisation, une couche correspond à un ensemble de fonctions ou de processus cohérents entre eux et assure une fonction précise. Deux couches adjacentes sont généralement indépendantes dans leurs fonctions, mais les échanges d'informations s'effectuent au niveau des interfaces. Les protocoles correspondent à l'implémentation donnée d'une couche. Enfin, l'ensemble des couches et protocoles forment l'architecture du réseau. Plus précisément, les couches basses (physique, liaison, réseau) du modèle sont nécessaires à l'acheminement des informations entre les extrémités concernées et dépendent du support physique. Les couches hautes (session, présentation, application) sont responsables du traitement de l'information relatif à la gestion des échanges entre les systèmes informatiques. La couche « transport » et les couches hautes n'interviennent qu'entre hôtes distants.

Le modèle en couches OSI traite l'information à transmettre par les différentes couches d'une manière indépendante. En réalité, 4 couches sont suffisantes pour modéliser le découpage fonctionnel : application, réseau, liaison et physique, très peu d'applications nécessitant un découpage en 7 couches. Le modèle OSI apparaît en réalité trop complexe voire trop complet pour les réseaux Ad Hoc [6] et le modèle TCP/IP est plus adapté (cf *figure 1.4*). L'objectif du modèle classique est d'assurer un transfert sans perte de paquets, sans pour autant garantir une qualité de service à une application donnée. L'inconvénient de ce mode de fonctionnement est d'empêcher les couches non voisines de communiquer et d'agir conjointement pour assurer une qualité de service acceptable propre à l'application.

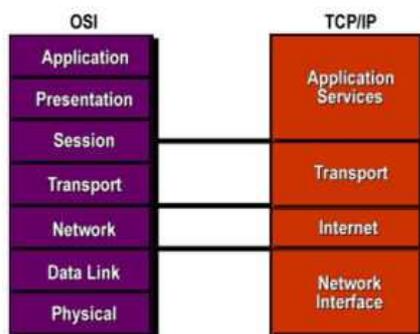


Figure 1.4 : Le modèle TCP/IP par rapport au modèle OSI.

A partir de ce constat ont été introduits des mécanismes, dits *cross-layer* [7][8], permettant aux couches non voisines d'échanger l'information et d'agir conjointement pour assurer la qualité de service dans le réseau. Ce mode de fonctionnement autorise alors la mise en place de stratégies de transmission entre deux couches non voisines dans le modèle OSI. Bien que la notion de *cross-layer* semble aller à l'encontre du principe du modèle OSI qui cherche à assurer l'inter-connectivité de services et d'applications variées, il existe des approches *cross-layer* transparentes qui permettent une communication entre les couches sans mettre en péril l'ensemble du système [7]. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement aux interactions entre les couches « physique » et « réseau ».

1.2 Couches basses pour une simulation VANETs

Deux moyens distincts, mais complémentaires, fournissent les informations nécessaires à l'étude du comportement des VANETs : l'expérimentation et la simulation. Toutefois, les mesures étant coûteuses et complexes à mettre en œuvre, de nombreux modèles ont été développés afin de s'affranchir de ces contraintes. Chacune des couches du modèle OSI doit être modélisée pour pouvoir effectuer une simulation de réseau VANET, depuis les couches basses (physique, liaison et réseau) jusqu'aux couches hautes (transport, session, présentation et application). Dans cette partie, la modélisation des couches basses est présentée et leur importance est expliquée. Les couches hautes ne sont pas traitées.

1.2.1 La couche physique

La modélisation de la couche physique est un élément central des simulations. Sans une modélisation réaliste de cette couche incluant la prise en compte des propriétés du canal, les résultats obtenus en simulation ne seront jamais en adéquation avec ceux obtenus dans le monde réel. Cette section aborde les techniques et méthodes pour modéliser une couche physique VANET.

La modélisation de la couche physique se scinde en deux parties distinctes : la modélisation du canal de transmission, et les différents traitements du signal nécessaires avant sa transmission dans le canal, tels que la modulation et le codage canal qui permettent respectivement d'adapter le signal au support de transmission et de protéger l'information contre les erreurs induites par le canal de transmission.

1.2.1.1 Le canal de transmission

Le canal de transmission se décompose en deux parties : le canal de propagation, c'est-à-dire les mécanismes de propagation des ondes radioélectriques entre les antennes d'émission et de réception, ainsi que les antennes elles-mêmes. Dans un contexte VANETs, le canal de propagation est un canal multi-trajets. Les systèmes antennaires peuvent être mono-antennes ou multi-antennes. On y associe ainsi des techniques nommées SISO (Simple Input Simple Output) ou MIMO (Multiple Input Multiple Output). La technique MIMO basée sur la diversité spatiale du canal permet en principe d'optimiser les performances du lien radio. Les deux cas SISO et MIMO sont abordés dans cette partie.

SISO

Le canal de propagation est le support physique qui permet l'échange de l'information grâce à la propagation des ondes électromagnétiques. Dans le cas idéal, celles-ci ne sont altérées que par la fréquence d'émission et la distance au récepteur. Mais en réalité, les ondes électromagnétiques interagissent avec l'environnement et entraînent le phénomène de multi-trajets. Lorsque les ondes électromagnétiques se propagent dans l'environnement, elles rencontrent des obstacles avec lesquels elles vont interagir. Ces obstacles, souvent appelés diffuseurs, peuvent créer les interactions suivantes, en fonction de la géométrie de l'obstacle :

- La réflexion [9] : elle se produit lorsque l'onde rencontre un obstacle de grande dimension par rapport à la longueur d'onde. On distingue deux types de réflexion : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse. Si la surface réfléchissante est lisse, c'est-à-dire que la taille des irrégularités à la surface de l'obstacle est petite devant la longueur d'onde, on parlera de réflexion spéculaire. A l'inverse, si la surface réfléchissante est irrégulière ou rugueuse, on parlera de réflexion diffuse.
- La diffraction [9] : elle se produit lorsque l'onde électromagnétique atteint une arête ou une surface courbe d'un objet. L'onde se divise alors en une multitude d'ondes électromagnétiques. Dans ce cas, l'élément diffractant peut être apparenté à une source rayonnante secondaire.
- La réfraction (ou transmission) [9] : lorsque la nature du matériau le permet, une partie de l'onde électromagnétique traverse la surface et dérive de sa direction originale selon la loi de Snell-Descartes et selon les propriétés électriques des milieux considérés.
- la diffusion (ou dispersion) [9] : elle est produite par un ensemble d'obstacles (exemple feuillage) de dimensions inférieures à la longueur d'onde. La résultante est une superposition de diffractions élémentaires. L'onde électromagnétique est donc redirigée dans toutes les directions avec une atténuation et un déphasage variables suivant des lois complexes.

Ainsi, le canal de propagation est caractérisé essentiellement par les phénomènes de trajets multiples liés aux interactions électromagnétiques comme l'illustre la *figure 1.5*.

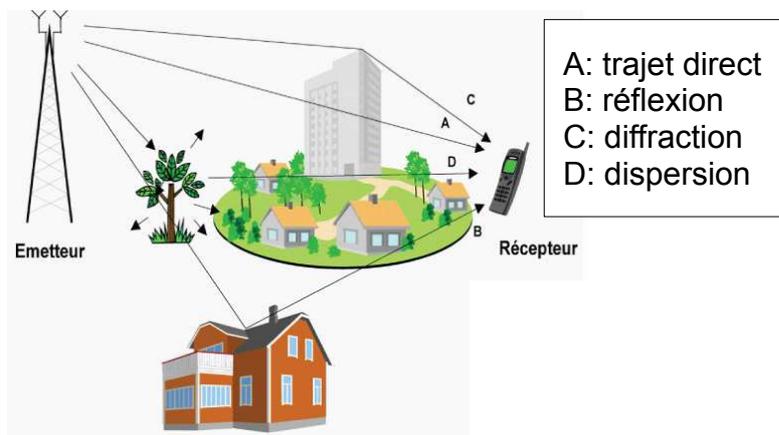


Figure 1.5 : Phénomènes de propagation de l'onde dans un environnement urbain.

Ce phénomène est primordial car, grâce à lui, des récepteurs masqués par un obstacle peuvent communiquer par l'intermédiaire des ondes issues d'interactions électromagnétiques. Le phénomène de multi-trajets contribue donc au bon fonctionnement des transmissions sans fil. Cependant, les différents trajets captés par le récepteur entraînent des interférences constructives ou destructives du signal reçu en fonction de leur déphasage respectif. Ces interactions créent des fluctuations importantes de la puissance de réception et perturbent la transmission. En effet, la propagation par trajets multiples engendre des trajets décalés dans le temps et crée un étalement temporel de l'onde émise. Dans ce cas, on dit que le canal est dispersif en temps.

De par la nature de l'environnement et le caractère mobile lié au contexte VANET, le canal de propagation possède également des propriétés de variabilités spatio-temporelles :

- - variabilité temporelle : elle est due aux mouvements des éléments dynamiques présents dans l'environnement. Cela entraîne l'apparition et/ou la disparition de trajets et modifie les propriétés des trajets existants. Ces modifications ont des origines très diverses comme le passage d'un véhicule, d'une personne, etc...
- - variabilité spatiale : elle est due au déplacement des terminaux et se superpose à d'éventuels mouvements de l'environnement. Les interactions électromagnétiques varient alors en fonction de la position des émetteurs et/ou des récepteurs.

Ces variations sont proportionnelles à la vitesse et au sens de déplacement de l'objet avec lequel l'onde a interagi. Ce phénomène est appelé : l'« effet Doppler ». Cet effet traduit le décalage fréquentiel subi par le signal reçu. Christian Doppler fut celui qui décrit ce phénomène pour la première fois en 1842. Ce phénomène est fonction de la vitesse des éléments mobiles de l'environnement, émetteur et récepteur compris.

Dans un contexte général de transmissions sans fil, et particulièrement dans les réseaux VANETs, ces variabilités vont agir sur les propriétés de la transmission et modifier les conditions de réception. De plus, à l'atténuation de l'onde en fonction de la distance, se superposent deux types d'évanouissement qui introduisent une fluctuation du niveau de puissance reçue : les évanouissements à grande échelle et les évanouissements à petite échelle. Les premiers sont dus aux effets de masque dans l'environnement produits par des obstacles tels que les bâtiments. Les évanouissements à petite échelle sont la conséquence directe de la propagation par trajets multiples. Ces phénomènes sont gérés au niveau du système de communications numériques pour en limiter leurs effets sur la qualité du signal reçu.

Le canal de propagation instantané peut être considéré comme un filtre linéaire dont la fonction caractéristique, appelée « réponse impulsionnelle du canal », est la base des paramètres caractérisant le canal de propagation, permettant ainsi d'exprimer mathématiquement son comportement.

Si on considère que les variabilités temporelles et spatiales sont nulles, alors on a $h(\tau)$ la réponse impulsionnelle complexe du canal statique. L'équation 1.1 définit cette réponse impulsionnelle :

$$h(\tau) = \sum_{n=1}^N a_n e^{-j\theta_n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (1.1)$$

avec N le nombre de trajets existants, a_n l'amplitude de chaque trajet, τ_n le retard de propagation et un déphasage θ_n liée aux interactions électromagnétiques subies par le trajet.

Un canal VANET réel n'est pas invariant. Toutes les variables de l'équation 1.2 précédemment fixes varient en réalité dans le temps et dans l'espace, ce qui donne :

$$h(t, \vec{r}, \tau) = \sum_{n=1}^N a_n(t, \vec{r}) \delta(\tau - \tau_n(t, \vec{r})) e^{-j\theta_n(t, \vec{r})} \quad (1.2)$$

La variabilité du canal de propagation est un élément important dans la compréhension de la propagation des ondes (cf. équation 1.2).

Il existe plusieurs représentations possibles pour caractériser le canal de propagation SISO. La théorie de Bello [10] permet d'obtenir ces différentes représentations en utilisant des transformées de Fourier sur les variables temporelle, spatiale et fréquentielle du canal .

MIMO

La technologie MIMO consiste à utiliser plusieurs antennes émettrices et réceptrices pour profiter de la diversité spatiale du canal de propagation en exploitant judicieusement le phénomène de multi-trajets. L'objectif est d'augmenter la capacité du canal sans augmenter la puissance d'émission grâce à l'utilisation de plusieurs antennes. La technologie MIMO offre ainsi théoriquement des performances globales du système supérieures à la technologie SISO. La figure 1.7 illustre le principe des technologies SISO et MIMO.

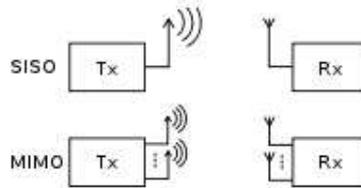


Figure 1.7 : Les principes des technologies SISO et MIMO.

Le passage de la technologie SISO à la technologie MIMO entraîne des changements dans la façon de caractériser le canal de propagation. En effet, la complexité de l'analyse est désormais fonction du nombre d'antennes émettrices et réceptrices, et les paramètres caractéristiques du canal deviennent, de fait, des fonctions matricielles. Ainsi, nous débutons par la définition de la matrice canal MIMO :

$$H = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau) & h_{12}(\tau) & \cdots & h_{1N_t}(\tau) \\ h_{21}(\tau) & h_{22}(\tau) & \cdots & h_{2N_t}(\tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1}(\tau) & h_{N_r2}(\tau) & \cdots & h_{N_rN_t}(\tau) \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Chaque $h_{ij}(\tau)$ est une réponse impulsionnelle telle qu'elle a pu être définie pour le cas SISO.

A partir de l'équation 1.3, on peut définir les critères de corrélation MIMO, à savoir les corrélations entre sous-canaux permettant d'évaluer le gain obtenu avec l'utilisation d'antennes multiples. On peut également caractériser l'augmentation de la capacité MIMO [11].

1.2.1.1 Les communications numériques

L'appellation « communications numériques » regroupe les techniques de traitement numérique du signal dont les plus connues sont la modulation numérique et le codage canal. La figure 1.8 représente le synoptique simplifié d'une chaîne de transmission numérique.

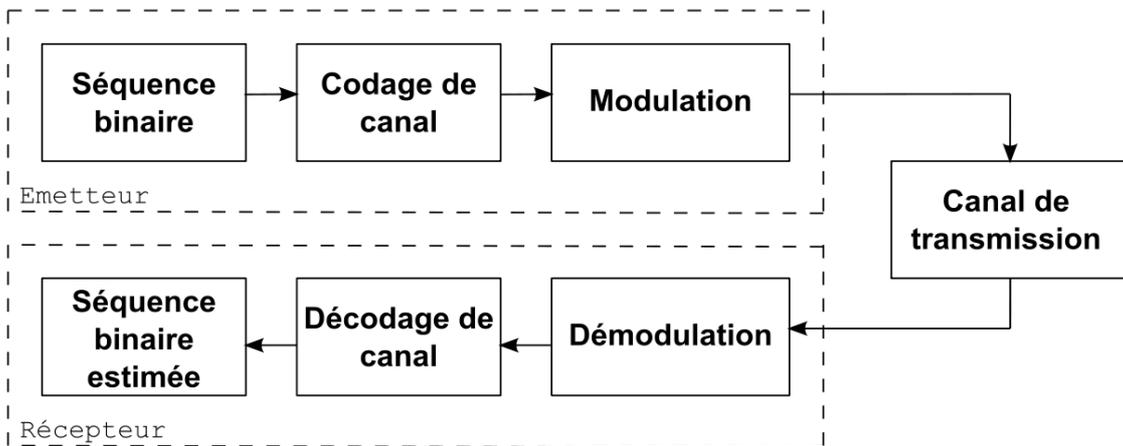


Figure 1.8 : Synoptique simplifié d'une chaîne de transmission numérique. [9].

Les méthodes de codage/décodage et de modulation/démodulation permettent d'adapter le signal radio au canal de propagation et d'améliorer la qualité des transmissions. Les principes généraux de ces techniques sont présentés rapidement ci-dessous.

Les modulations numériques

La modulation permet d'adapter l'information à transmettre au canal de transmission en réalisant une transposition en fréquence et en transformant l'information numérique en un signal électrique. Plus précisément, la modulation consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse dont l'expression générale est donnée par l'équation 1.4 :

$$s(t) = A(t) \cdot \cos(\omega(t) + \phi(t)) \quad (1.4)$$

avec $A(t)$ qui représente l'amplitude du signal modulé, $f(t) = \omega(t)/2\pi$ sa fréquence instantanée et $\phi(t)$ sa phase.

La modulation binaire ne permet de prendre que deux valeurs pour représenter l'information à transmettre alors que la modulation M-aire permet quant à elle de prendre M valeurs. Le nombre d'états est donc égal à $M = 2^n$ avec n le nombre de bits.

Un paramètre important de la transmission est le débit. Dans le cas binaire, le débit s'exprime par $\text{débit} = 1/T$ avec T la durée d'un bit. Dans le cas d'une modulation M-aire, la période du symbole (constitué d'un mot de n bits) est $T_s = nT$. La rapidité de modulation se définit alors comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou plusieurs

paramètres modifiés simultanément. Les changements d'états peuvent être : un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude. Enfin, l'efficacité spectrale d'une modulation se définit par le paramètre $\eta = \text{débit}/B$ avec B la largeur de la bande occupée par le signal modulé. Dans le cas d'une modulation M-aire, l'efficacité spectrale augmente en fonction du nombre de bits par symbole.

Pour répondre aux besoins des VANETs, il est nécessaire d'utiliser des modulations robustes. Dans le cas de canaux sélectifs en fréquence, il faut adjoindre à la démodulation une étape préalable d'« égalisation » du canal pour contrer le phénomène d'interférence inter-symbole. Il faut noter qu'au-delà des techniques de modulation monoporteuse, il existe la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) qui est une modulation multiporteuse. Cette dernière permet de répondre au problème de synchronisation grâce à l'utilisation d'un préambule, mais aussi à l'interférence entre symboles grâce à l'adjonction d'un préfixe dit cyclique ou appelé intervalle de garde, en début de chaque symbole OFDM. Cette modulation a été adoptée dans le standard dédié au VANET 802.11p [12] qui sera présenté par la suite.

Le codage canal

L'objectif des techniques de codage de canal est de protéger l'information contre les perturbations du canal, voire corriger les erreurs introduites par la transmission. Le principe des Codes Correcteurs d'Erreurs (CCE) consiste à ajouter de la redondance à l'information d'une manière contrôlée [13]. Cette redondance est exploitée par le décodeur pour détecter et corriger les erreurs de transmission. Un CCE est défini par son rendement R_c . Si un CCE encode un bloc de taille k en un bloc de taille m , avec $m > k$, le rendement sera $R_c = k/m$. Ainsi, plus R_c est petit, plus le CCE introduit de la redondance et plus son pouvoir de correction est grand.

Les performances d'un CCE sont évaluées par le gain de codage calculé par rapport à un système sans codage de canal. Le gain de codage mesure l'écart en dB entre les rapports signal à bruit des systèmes avec et sans codage pour atteindre la même valeur de TEB. Les codes correcteurs sont classifiés selon leur capacité à approcher la limite théorique d'entropie de Shannon. Les Turbo-codes [14] et les codes LDPC [15] sont ceux qui s'en approchent le plus alors que les codes convolutifs [16] et les codes en blocs linéaires [13] sont qualifiés de code de vieille génération.

Les principales grandeurs caractéristiques de la couche physique pour qualifier la qualité de réception sont le taux d'erreurs binaires et la puissance reçue.

A titre d'exemple, pour les normes IEEE 802.11a, 802.11p, le tableau 1.1 ci-dessous indique les caractéristiques des modulations et codes correcteurs d'erreurs mis en oeuvre. Notons que dans cette thèse, la norme 802.11p sera considérée car elle constitue le standard de couche physique retenu pour les véhiculaires depuis la fin 2010 [12]. Il s'agit en fait d'une adaptation du standard 802.11a pour les communications entre véhicules (Dedicated Short Range Communication). Notons en particulier qu'il existe un doublement du temps symbole, de l'intervalle de garde et de la durée du préambule afin de mieux gérer les conséquences de la mobilité.

Paramètres	802.11a	802.11p
Débit (Mb/s)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	3, 4, 5, 6, 9, 12, 18 24, 27
Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Rendement du code correcteur	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4
Nombre de sous-porteuses OFDM	48	48
Temps symbole	4µs	8µs
Intervalle de garde	0,8µs	1,6µs
Durée de la FFT	3,2µs	6,4µs
Durée du préambule	16µs	32µs
Largeur de bande d'une sous-porteuse	0,3125 MHz	0,15625 MHz

Tableau 1.1: Paramètres 802.11p comparés à 802.11a.

Enfin, la norme 802.11n peut difficilement être comparée aux normes a et p car elle rajoute des fonctionnalités supplémentaires (MIMO jusqu'à 4 stream, davantage de porteuses OFDM, largeur de bande doublée, agrégation de canaux, codes correcteurs LDPC, etc). On peut cependant les comparer en terme de débit. La norme 802.11n utilise la bande de fréquence des 2,4 GHz et des 5 GHz, avec un débit théorique jusqu'à 600 Mbits/s.

1.2.2 La couche liaison

La couche liaison se décompose en deux sous-couches : LLC et MAC. La sous-couche LLC a pour objectifs de gérer le séquençement des trames, l'acquittement des messages reçus, la détection et corrections des erreurs dues à la transmission, et le contrôle du flux. La sous-couche MAC a pour rôle de mettre en œuvre les mécanismes d'accès au canal qui contrôlent l'accès et le partage du canal entre les différents nœuds qui désirent communiquer dans un réseau.

C'est ainsi que les trames de communication définissent la mise en forme syntaxique des données issues de la couche physique. Elles permettent entre autres d'initier les communications entre les entités, de gérer les modes de communications ou encore de détecter les éventuelles erreurs introduites par le canal de propagation. La mise en œuvre des trames de communications passe généralement par l'insertion de diverses informations (bits additionnels, entêtes, somme de contrôle ...) nécessaires au récepteur pour déterminer le début et la fin d'une trame ou chaque champ utile qui la compose (adresse, données, champs de synchronisation). La détection des erreurs introduites par le canal est quant à elle généralement réalisée *via* une somme de contrôle (checksum en anglais) qui est insérée par l'émetteur et ensuite vérifiée par le récepteur.

En ce qui concerne l'accès au canal, il n'y a aucune gestion centralisée. Le contrôle se fait de façon distribuée, c'est-à-dire que les nœuds vont contrôler l'accès au canal à l'aide d'une phase d'écoute. Le protocole couramment utilisé dans ce cas est le CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) [17].

Au niveau liaison, dans les simulateurs de réseaux, un modèle d'erreurs est utilisé conjointement avec un modèle de propagation pour évaluer la qualité d'un lien radio. Le modèle d'erreurs le plus simple est le modèle « tout ou rien ». Il est basé sur un simple seuillage de la puissance reçue par rapport au seuil de communication du récepteur. Si la puissance reçue est au-dessus du seuil de communication, alors le taux de perte de paquets est égal à 0. Cela signifie que la communication sur ce lien se fait sans aucune erreur. Si la puissance reçue est au-dessous du seuil de communication, alors le taux de pertes de paquets est égal à 1. Cela signifie que tous les paquets transitant sur ce lien seront perdus.

Pour schématiser, la zone de communication d'un terminal calculée *via* le modèle « tout ou rien » peut être représentée par un cercle de rayon R autour du terminal (cf. *figure 1.9a*), avec S_0 l'émetteur, S_1 la zone où la puissance reçue est inférieure au seuil de communication et S_2 la zone où la puissance reçue est supérieure à ce seuil. Ce rayon dépend à la fois du seuil de communication du terminal et du modèle de propagation adopté pour le calcul de la puissance reçue.

Il existe également une version améliorée de ce modèle qui définit un deuxième seuil de puissance plus faible que celui du seuil de communication. La *figure 1.9b* illustre les zones de communication et de détection obtenues par ces deux modèles. Le deuxième seuil est appelé le « seuil de détection ». Un récepteur positionné dans la zone entre les seuils de communication et de détection, qui est repérée par la zone S_3 dans la *figure 1.9b*, est susceptible de détecter une activité sur le canal, mais les paquets reçus seront erronés et supprimés au niveau de la couche MAC.

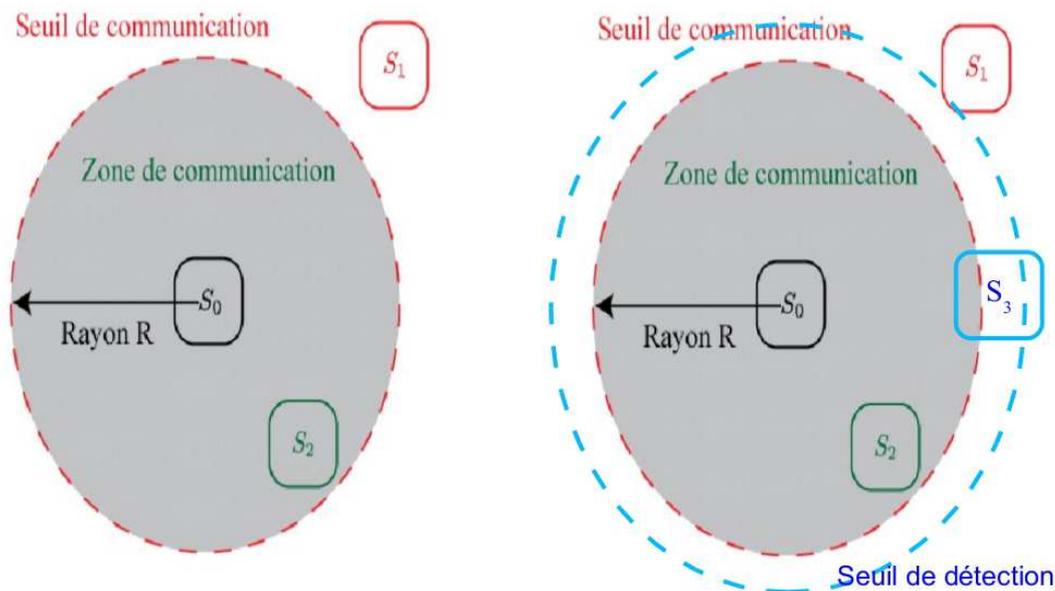


Figure 1.9a : Modèle tout ou rien standard.

Figure 1.9b : Modèle tout ou rien avec seuil de détection.

Il existe d'autres modèles d'erreurs appelés les modèles à pertes. Ils sont plus complets que les modèles « tout ou rien ». En effet, ils déterminent la valeur exacte de taux de perte de paquets du lien radio à partir de la puissance reçue. Les auteurs de [18] utilisent les abaques de TEB (Taux d'Erreur Binaire) de la norme IEEE 802.11b sur un canal gaussien pour déterminer la valeur du TEB qui correspond à la puissance reçue entre l'émetteur et le

récepteur. Le taux de perte de paquets est ensuite calculé à partir du TEB et de la taille des paquets transmis avec la formule suivante : Taux de perte de paquets = $1 - (1 - \text{TEB})^n$, avec n la taille des paquets en bits.

Pour résumer, la couche liaison établit le lien entre le taux d'erreurs binaires de la couche physique et les modèles d'erreurs, c'est-à-dire elle évalue le taux de perte de paquets. Les différentes techniques d'accès existantes ne sont pas présentées car elles ne sont pas dans le périmètre de cette thèse.

1.2.3 La couche réseau

Les VANETs sont des réseaux sans infrastructure fixe. Les nœuds établissent entre eux une communication à un saut lorsqu'ils sont à portée radio l'un de l'autre, et multi-sauts entre deux nœuds trop distants. Une communication multi-sauts est réalisable grâce à la mise en place d'un chemin de routage reliant le nœud source au nœud destination et impliquant un ou des nœuds intermédiaires qui servent de relais. C'est le protocole de routage qui est chargé de réaliser cette tâche.

Il existe de nombreuses classifications des protocoles de routage Ad Hoc ainsi qu'une quantité considérable de propositions pour de nouveaux protocoles, chacun répondant plus ou moins bien aux différentes contraintes dues au contexte traité [19][20]. Ces différents exemples de classification montrent la difficulté à classer les protocoles de manière hiérarchique.

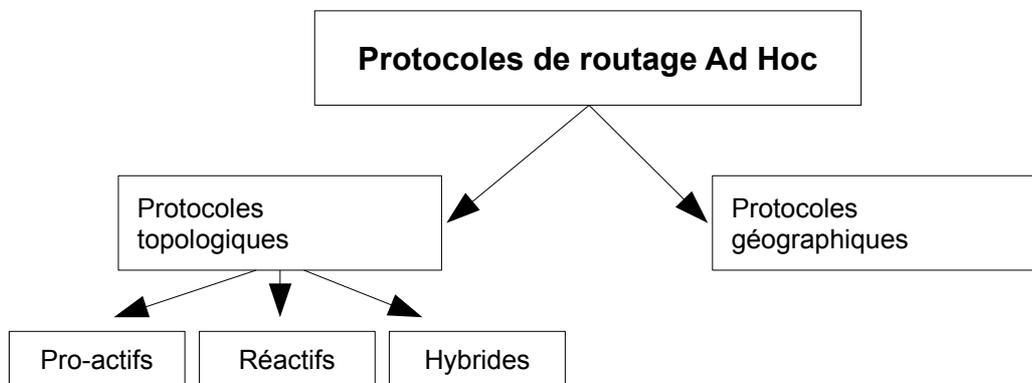


Figure 1.10 : Notre classification des protocoles de routage existants.

La figure 1.10 présente la méthode la plus classique de classification des protocoles de routage. La distinction principale se fait entre les protocoles géographiques et les protocoles topologiques. Le premier groupe contient les protocoles utilisant des données géographiques pour fonctionner, issues de GPS par exemple, et le deuxième groupe contient les protocoles envoyant eux-mêmes des messages de contrôle pour déterminer la topologie du réseau. Les protocoles topologiques se composent de trois sous-groupes : les protocoles pro-actifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

Des études plus complètes sur les protocoles de routage pour les VANETs sont proposées dans les références [21] et [22]. Elles déterminent une classification des protocoles en fonction de leurs paramètres et performances, permettant ainsi un choix de l'un ou l'autre en fonction de ces critères.

La partie suivante présente une étude comparative synthétique de quelques protocoles tout en soulignant les avantages et les limitations de chaque type de protocole. L'étude comparative se divise en quatre groupes : les protocoles pro-actifs, réactifs, hybrides et géographiques.

Protocoles pro-actifs

Le principe des protocoles de routage pro-actifs est de maintenir une table de routage comportant tous les chemins possibles pour atteindre le(s) nœud(s) destinataire(s). Ainsi, à chaque modification topologique, le protocole de routage va recalculer une table de routage complète pour remettre à jour la liste de tous les chemins possibles dans le réseau.

DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector*) [23] est un exemple de protocole pro-actif. Chaque nœud dans le réseau maintient une table de routage qui comporte les informations suivantes :

- la liste de tous les nœuds destinataires possibles,
- le nombre de sauts nécessaires pour atteindre chaque destination,
- le numéro de séquence qui correspond à une destination.

Chaque nœud envoie sa table de routage à tous les nœuds de son voisinage lorsqu'un changement se produit. La table de routage est mise à jour selon deux paramètres : le temps et l'événement. Pour chaque mécanisme de mise à jour, le numéro de séquence est incrémenté pour différencier les nouvelles routes des anciennes. Dans le protocole DSDV, le nœud attend la prochaine mise à jour initiée par la destination, avant de mettre à jour l'entrée associée vers cette destination dans la table de routage. Cependant, cette méthode d'attente ralentit le protocole et diminue ses performances.

Le protocole GSR (*Global State Routing*) [24] est similaire au protocole DSDV décrit précédemment en terme de mise à jour de la table de routage. Dans le protocole GSR, chaque nœud maintient :

- la liste de voisinages,
- la table de la topologie du réseau,
- la table des nœuds contenant l'adresse du nœud suivant,
- la table de distance comportant le plus court chemin vers chaque destination.

Ainsi, lors d'un changement des états des liens dans le réseau et grâce aux messages de contrôle diffusés dans le réseau, toutes les tables maintenues sont mises à jour. Il est utile de préciser que les mises à jour sont appliquées lorsque le numéro de séquence est supérieur au numéro de séquence précédemment sauvegardé dans la table.

Le protocole HSR (*Hierarchical State Routing*) [25] est un des exemples les plus significatifs des protocoles pro-actifs dits *hiérarchiques*. Les protocoles de routage hiérarchiques se basent sur la décomposition du réseau en zones. Dans HSR, le réseau est découpé en un ensemble de groupes, dont la somme forme le réseau entier. Dans chaque groupe, un nœud est élu responsable pour gérer le groupe et assurer la communication avec les représentants des autres groupes. Dans la décomposition en groupes, nous distinguons trois types de nœuds :

- des nœuds internes n'ayant aucun rôle spécifique au sein du groupe,
- des nœuds liaison qui relient deux groupes,
- des nœuds représentants de groupe (appelés aussi « ClusterHeads »).

On détecte deux niveaux hiérarchiques à partir de cette décomposition. Le niveau 0 est composé des groupes, c'est-à-dire des nœuds internes, des nœuds liaisons et des nœuds représentants : c'est la topologie physique du réseau. Le niveau 1 est composé des nœuds représentants reliés virtuellement. La transmission des paquets se fait en fonction de la hiérarchie du nœud. L'émetteur envoie le paquet vers le nœud supérieur dans la hiérarchie qui retransmet le paquet au nœud de liaison qui, à son tour, retransmet le paquet vers le représentant du groupe auquel le nœud destinataire appartient.

Protocoles réactifs

Le principe des protocoles de routage réactifs est de créer une table de routage avec au moins un chemin possible pour atteindre le(s) nœud(s) destinataire(s). Ainsi, à chaque nouvelle communication, le protocole de routage va recalculer une table de routage pour trouver un chemin jusqu'à la destination.

AODV (*On Demand Distance Vector*) [26] est l'un des plus célèbres protocoles de routage réactifs. Les chemins sont découverts et maintenus à la demande. Lorsqu'un nœud émetteur souhaite envoyer des données à un nœud destinataire, la première étape consiste à diffuser (« Broadcast ») à tous les nœuds du réseau un message "RREQ" (Route REQuest) de découverte de route. Lors de la réception d'un message "RREQ", chaque nœud agit en fonction des cas de figure suivants :

- s'il n'est pas le destinataire, alors le nœud retransmet le message "RREQ" en ajoutant sa propre adresse dans le chemin de routage,
- s'il n'est pas le destinataire et si le message "RREQ" contient déjà sa propre adresse dans le chemin de routage, alors le nœud élimine le message sans le transmettre,
- s'il est le destinataire, alors le nœud renvoie un message "RREP" en suivant le chemin de routage contenu dans le message "RREQ".

Le message RREP est le message de confirmation d'établissement d'une connexion entre émetteur et récepteur. Dès que l'émetteur reçoit ce message, la communication peut commencer.

DSR (*Dynamic Source Routing*) [27] est un autre protocole de routage réactif. Il possède un mécanisme de routage différent de celui du protocole AODV. En effet, dans le protocole de routage DSR, l'en-tête de chaque paquet transmis par le nœud émetteur contient l'adresse de tous les nœuds intermédiaires ainsi que l'adresse du nœud destinataire. Cette modification alourdit les messages et donc les transmissions avec ce protocole. Cependant elle s'avère très utile en cas de rupture de route. Similaire à la majorité des protocoles de routage

réactifs, le mécanisme du protocole DSR repose sur deux procédures essentielles : la découverte et le maintien des routes lors du transfert des paquets. L'intérêt de DSR ne se situe pas dans la découverte de routes mais dans le maintien de celles-ci. En cas d'erreur de transmission, le protocole DSR permet de détecter où se situe la rupture de route grâce au chemin complet présent dans l'en-tête de chaque paquet. Ainsi, le mécanisme de redécouverte de route peut recommencer là où a eu lieu la rupture et non pas depuis l'émetteur. Cela permet de lutter contre les changements rapides de la topologie du réseau qui engendrent des ruptures de route fréquentes.

Protocoles hybrides

Une troisième catégorie de protocoles unicast, c'est-à-dire point à point, est présentée dans cette section : les protocoles hybrides. Ils mettent en place simultanément un routage pro-actif et un routage réactif. Le mécanisme de découverte de route dans les protocoles pro-actifs est plus rapide puisque les chemins de routage possibles entre les nœuds du réseau sont établis au préalable, ce qui n'est pas le cas dans les protocoles réactifs où les chemins sont établis à la demande. Dans les VANETs, il est difficile de prévoir et d'établir des chemins de routage au préalable en raison de la forte mobilité des véhicules. Aussi, les protocoles hybrides apparaissent comme un bon compromis. Les protocoles ZRP [28] et CBRP [29] appartiennent à cette catégorie.

ZRP (*Zone Routing Protocol*) utilise la notion de zone. Une zone regroupe l'ensemble des nœuds qui se situent à une distance maximum de sauts d'un nœud de référence. Le routage au sein d'une zone se fait de manière pro-active alors que le routage vers des nœuds extérieurs à cette zone se fait de manière réactive. Nous distinguons dans ZRP les deux procédures : "IARP" et "IERP" respectivement pour les routages intrazone et interzone. Ainsi, ZRP regroupe bien les deux mécanismes pro-actif et réactif en essayant de tirer le meilleur des deux approches et en tentant de limiter leurs inconvénients respectifs.

Un autre exemple de routage unicast hybride est le protocole CBRP (*Cluster-Based Routing Protocol*). Dans ce protocole, le réseau est décomposé en groupes appelés « clusters ». Chaque cluster est constitué de nœuds représentants de groupe ou « clusterheads », de nœuds routeurs ou « gateways », ainsi que de nœuds standards. La tâche des clusterheads est d'abord de découvrir les routes, puis de retransmettre les paquets vers la destination, et enfin de maintenir les routes. Les nœuds gateways quant à eux jouent le rôle de nœuds relais pour assurer la retransmission des paquets entre les clusterheads. Le côté réactif du protocole CBRP apparaît lorsqu'un nœud émetteur souhaite envoyer des données à un nœud récepteur : il diffuse une requête de demande de chemin uniquement au clusterhead. Celui-ci vérifie si le nœud destinataire est dans le groupe, sinon il retransmet la demande aux clusterheads des groupes voisins.

Protocoles géographiques

Le mécanisme de routage des protocoles géographiques se base sur les coordonnées de position GPS des nœuds. La destination est représentée par une région déterminée dans ces protocoles qui est appelée région cible. Les nœuds à l'intérieur de la région cible reçoivent les paquets lors de leurs diffusions dans celle-ci. Les protocoles de routage géographiques fonctionnent en deux étapes. La première étape consiste à retransmettre le paquet sur un chemin de routage construit à l'intérieur d'une zone déterminée, appelée zone de retransmission (« Forwarding Zone »). La deuxième étape consiste à diffuser le paquet aux nœuds à l'intérieur de la région cible (« Geocast Region »). Comme pour les autres familles de protocoles, la découverte des routes dans les protocoles géographiques peut s'effectuer de manière réactive ou pro-active.

DREAM [30] (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*) est un exemple de protocole géographique pro-actif. Les nœuds du réseau maintiennent une table de localisation. Cette table comporte les données géographiques des nœuds voisins. Elle est mise à jour avec des messages de contrôles diffusés périodiquement dans le réseau. Lors de la retransmission des paquets, le nœud source envoie le paquet dans la direction de la destination en fonction de sa table de localisation.

Le protocole géographique LAR [31] (*Location-Aided Routing*) est quant à lui réactif. La phase de transmission des paquets est précédée par un mécanisme de découverte des chemins reliant le nœud source à la zone de diffusion. La diffusion des messages de découverte de route est limitée à une zone de retransmission déterminée. La différence principale entre le protocole LAR réactif et le protocole DREAM pro-actif apparaît dans l'étape de retransmission des paquets. L'espace de retransmission dans LAR est réduit comparé au protocole DREAM, ce qui diminue le coût de retransmission des paquets.

Il existe d'autres types de protocoles géographiques basés sur des techniques variées. Par exemple, le protocole géographique GRUV [32] propose une approche basée sur la retransmission maillée dans la zone de retransmission, tout en prenant en compte l'infrastructure du réseau routier. Autre exemple : les protocoles géographiques hiérarchiques, dont GeoGrid [33] est l'illustration.

1.1 Modélisation de la mobilité

Une problématique fondamentale pour la simulation des réseaux VANETs concerne les modèles de mobilité utilisés pour la simulation. L'utilisation d'un modèle de mobilité non dédié peut produire des résultats erronés car il ne prendrait pas en compte le comportement particulier des véhicules dans ces réseaux. Par exemple, certains modèles de mobilité sont très largement utilisés alors que les comportements qu'ils peuvent générer n'ont aucun lien avec la réalité des VANETs, et de nombreux efforts de recherche utilisant ces modèles n'ont pas été productifs [34]. La communauté scientifique s'est donc intéressée à d'autres modèles de mobilité, du plus simple au plus complexe, pour générer des comportements plus réalistes.

Pour pouvoir reproduire un comportement réaliste, les auteurs de la référence [35] ont montré que les simulateurs de mobilité doivent tenir compte de deux critères : le générateur de trafic (*Traffic Generator*) et les contraintes de mobilité (*Motion Constraints*).

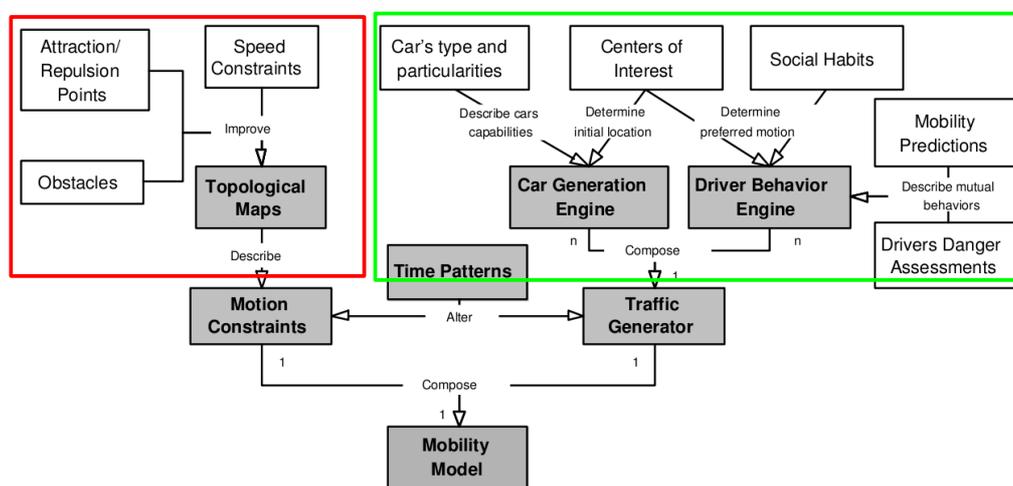


Figure 1.11 : Synoptique des modèles de mobilité issue de [35].

Le *Motion Constraints* représenté en rouge sur la figure 1.11 modélise la carte topologique dans laquelle les véhicules vont se déplacer. Tous les éléments liés à cette carte sont donc pris en compte et imposent des contraintes. On trouve notamment les obstacles ou encore les points d'attraction qui ont un effet sur la vitesse maximum autorisée pour chaque route de la carte.

Le *Traffic Generator* représente le comportement des véhicules en fonction du trajet souhaité dans l'environnement de simulation. Il est représenté en vert sur la figure 1.11 et regroupe tous les éléments de conduite d'un automobiliste. Il modélise le parcours du véhicule en fonction de différents critères tels que le type de véhicule qui définit les possibilités du véhicule, ou encore les déplacements des autres nœuds dans l'environnement qui vont influencer son parcours. Concrètement, au niveau de la simulation, cela correspond :

- aux positions de départ et d'arrivée des nœuds,
- aux parcours des nœuds,
- à la vitesse des nœuds.

Les modèles de mobilité tentent de définir le comportement humain *via* des lois mathématiques qui modélisent différents comportements. Par exemple, un véhicule peut changer de voie de circulation pour doubler un véhicule plus lent ou au contraire ralentir pour suivre le véhicule qui le précède. Il existe de nombreux modèles, mais les plus utilisés sont les modèles « random way point » et « car following ».

Le modèle *random way point* [36] se contente de modéliser le comportement des véhicules de manière à ce qu'ils se déplacent perpétuellement. La vitesse des véhicules peut être fixe ou variable, et il peut y avoir des collisions entre véhicules. Ce modèle est très simple et ne modélise pas le comportement réaliste des véhicules dans les VANETs.

Le modèle *car following* [36] prend en compte les éléments topologiques de l'environnement et leur associe un comportement des véhicules qui permet d'éviter les collisions. Les véhicules se déplacent en fonction des autres véhicules de l'environnement et adaptent les parcours en conséquence. Ce modèle, beaucoup plus complexe et réaliste que le modèle *random way point*, est adapté pour les VANETs.

On trouve, dans la référence [36], une large liste de modèles de mobilité pour les VANETs qui constitue un bon point de départ pour toute personne voulant s'investir dans le domaine.

1.2 Les simulateurs pour les réseaux VANETs

La mise en œuvre sur le terrain de réseaux VANETs est extrêmement coûteuse et difficile. Aussi, la simulation est une étape nécessaire dans cette thématique. Il existe plusieurs simulateurs de réseaux Ad Hoc capables d'effectuer des simulations répondant aux critères des VANETs. Nous présentons dans cette partie les principes de fonctionnement et quelques simulateurs pouvant répondre à ceux-ci.

L'objectif de la simulation est de reproduire les mêmes résultats que ceux que l'on obtiendrait en conditions réelles. Un simulateur de réseau VANET réaliste se compose des éléments indispensables présentés précédemment : un simulateur de réseau Ad Hoc regroupant les bases « réseaux » d'une simulation VANET et un simulateur de mobilité.

Le simulateur de mobilité génère des fichiers qui décrivent la mobilité des nœuds dans un environnement, et qui sont transmis au simulateur de réseau Ad Hoc. Bien que les deux simulateurs soient indispensables à la simulation des réseaux VANETs, il n'y a aucun lien direct entre eux. L'un des problèmes que l'on rencontre alors est l'interconnexion entre les simulateurs. Il existe cependant des simulateurs intégrés qui regroupent les deux simulateurs au sein d'une même entité pour répondre au mieux à ce problème.

Cette partie montre les principes de ces deux éléments nécessaires à la simulation des VANETs, à savoir les simulateurs de réseau Ad Hoc et les simulateurs de mobilité.

1.2.1 Simulateurs de réseaux Ad Hoc

Il n'y a pas de principe de fonctionnement standard pour les simulateurs de réseau Ad Hoc ou les simulateurs de mobilité. Il existe plusieurs stratégies et architectures qui permettent de simuler un réseau Ad Hoc, chacune étant propre à un simulateur [37][38][39]. Chaque simulateur répond aux besoins de la simulation de réseau *via* des architectures variées, en fonction des objectifs que se sont fixés leurs développeurs. Cependant, ils ont tous le même but : reproduire le plus fidèlement possible le fonctionnement d'une pile protocolaire.

Les simulateurs payants tels que Opnet [40] ou Qualnet [41] avec des licences commerciales ne sont pas abordés dans cette thèse. Une liste plus exhaustive des outils de simulation dédiés aux VANETs est présentée dans la référence [42]. Cette partie aborde les principaux simulateurs issus du logiciel libre : NS-2, NS-3, GlomoSim et Omnett++.

NS-2

Le plus célèbre et le plus répandu des simulateurs de réseaux est sans conteste *Network Simulator 2* (NS-2) [43]. Il s'agit d'un simulateur à événements discrets disponible gratuitement et open source. L'ouverture du code source à la communauté a contribué à l'enrichir de nouveaux protocoles et de nouvelles fonctions au fil du temps. Il permet à l'utilisateur de définir un réseau et de simuler des communications entre les nœuds de ce réseau. La simulation doit d'abord être saisie sous forme de fichier texte que NS-2 utilise pour produire un fichier trace contenant les résultats.

NS-2 nécessite deux langages : OTcl (*Object Tools Command Language*) et C++. À travers le langage OTcl, l'utilisateur décrit les conditions de la simulation : topologie du réseau, caractéristiques des liens physiques, protocoles utilisés, etc. Bien que les scripts de simulation soient écrits en OTcl, la base du simulateur est en C++ ce qui permet à chacun de modifier à sa guise les différents protocoles. Ces éléments sont résumés sur la *figure 1.12*.

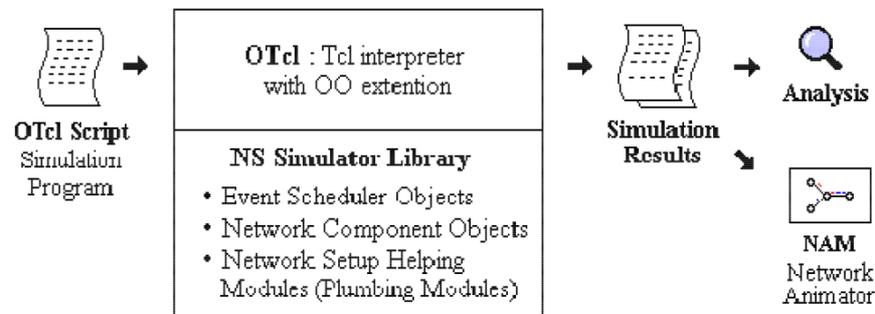


Figure 1.12 : Synoptique de l'interpréteur de script Otcl avec les bibliothèques C++ de simulation de réseau.

Comme le montre la *figure 1.12*, le script Otcl qui définit la simulation est interprété et associé aux bibliothèques C++ du simulateur NS-2. L'ensemble permet d'obtenir des fichiers de résultats autorisant l'analyse ou la visualisation de la simulation.

L'avantage de l'utilisation de ces deux langages est de faciliter au maximum l'écriture des scripts de simulation tout en gardant de bonnes performances du code grâce au C++. De plus, comme Tcl est un langage interprété, les changements dans les scripts de simulation ne nécessitent aucune compilation. Le désavantage majeur vient de la vitesse d'exécution des scripts. L'utilisation de deux langages entraîne aussi la nécessité de définir les éléments utiles à la simulation dans les deux langages pour pouvoir fonctionner.

Le simulateur NS-2 fonctionne sur le principe des événements discrets. Ainsi, le temps simulé est discrétisé, c'est-à-dire que la simulation change d'état à chaque « événement ». Un événement est un point du temps simulé référencé dans la simulation. Les changements d'états interviennent au temps simulé spécifié par l'événement. C'est le gestionnaire d'événements qui effectue cette tâche. Il est donc possible d'ordonner plusieurs événements dans le temps simulé. La simulation s'arrête lorsqu'il n'y a plus d'événements à interpréter. NS-2 modélise alors tous les éléments du réseau avec des classes hiérarchisées.

Le simulateur NS-2 imite le flot des paquets dans le réseau. L'environnement simulé contient un certain nombre de nœuds et chaque nœud contient des objets réseaux qui représentent des applications, des couches du modèle OSI ou tout autre élément du réseau nécessaire à la simulation. Ces objets réseaux interagissent les uns avec les autres en se passant des « paquets ». Comme dans un réseau réel, les paquets sont tout d'abord enrichis avec des en-têtes lorsqu'ils passent d'une couche du modèle OSI à l'autre dans un nœud (sens descendant), puis, après avoir été transmis *via* un médium simulé, chacun de ces en-têtes est décodé et désassemblé dans le nœud récepteur lors de la phase ascendante du modèle OSI.

Il existe de nombreuses contributions anciennes ou récentes pour NS-2, ainsi que des patches. Bien que son successeur existe déjà et que de nombreux autres simulateurs l'aient surpassé dans un domaine ou un autre, NS-2 n'en reste pas moins le plus utilisé des simulateurs de réseaux. De plus, il fait figure d'exception en matière de compatibilité avec les simulateurs de mobilité car il permet de prendre en compte facilement des formats de mobilité largement répandus. La présentation du simulateur faite ici n'est pas exhaustive. Plus de détails ainsi que des tutoriels sur NS-2 peuvent être trouvés sur le site officiel [43].

NS-3

Comme son nom l'indique, *Network Simulator 3* [44] est le successeur de NS-2. Son développement a commencé en 2006 et la première version stable est disponible depuis 2008. NS-3 a été programmé par la Georgia Institute of Technology, l'ICSI Center for Internet Research et le groupe de travail "Planète" de l'INRIA Sophia-Antipolis. NS-3 est développé en C++ et peut être relié au langage de script Python. Tout comme NS-2, il est gratuit et open source. De plus, il privilégie l'utilisation de logiciels libres, comme "Waf" (outils de compilation et distributions), "Doxygene" (génération automatique de documentation) ou encore le standard "posix" pour les fonctions liées à la gestion des sockets. Le but de NS-3 est de proposer un simulateur de réseaux capable de correspondre aux attentes des chercheurs.

L'architecture de NS-3 a été modifiée par rapport à celle de NS-2, et la rétrocompatibilité de NS-3 avec NS-2 n'est pas possible. Ainsi le double langage utilisé par NS-2 n'existe plus dans NS-3. Le langage OTcl a complètement disparu de son architecture. NS-3, ainsi que tous ses modèles associés, sont écrits en C++. Il reste cependant possible d'écrire du code dans d'autres langages de programmation, comme le Python ou le Perl, en utilisant des générateurs intégrés à NS-3 qui vont transcrire ce code en C++ *in fine*. L'objectif est de garder la possibilité de créer ces scripts flexibles sans besoin de compilation, et d'avoir accès en même temps aux performances d'exécution du C++.

NS-3 utilise principalement les avancées technologiques des compilateurs C++ et des nouvelles bibliothèques associées qui n'existaient pas lors de la création de NS-2. Le simulateur contient un système d'objets hiérarchiques, et un système intégré de production de résultat de simulation. Cette base est associée à un système de gestion de paquets efficace en terme de mémoire, ainsi que des algorithmes de simulation d'événements discrets qui gèrent la progression de chaque simulation. L'un des objectifs de cette architecture est de parvenir à simuler des réseaux de grande envergure, dans le même esprit que le simulateur GlomoSim, le tout avec un niveau de détails satisfaisant dans la simulation.

L'architecture réseau de NS-3 est basée sur les logiciels et matériels existants dans le monde réel. Cela facilite l'utilisation du simulateur et permet l'intégration aisée de nouveaux modèles. Par exemple, les paquets échangés dans la simulation sont équivalents au bit près, au même format que des paquets qui seraient échangés en expérimentation. Le passage de l'expérimentation à la simulation (et *vice versa*) est donc extrêmement commode avec NS-3. Et cela offre également la possibilité d'émuler l'un ou l'autre des éléments de la simulation sans avoir aucun problème de compatibilité entre l'existant et la simulation.

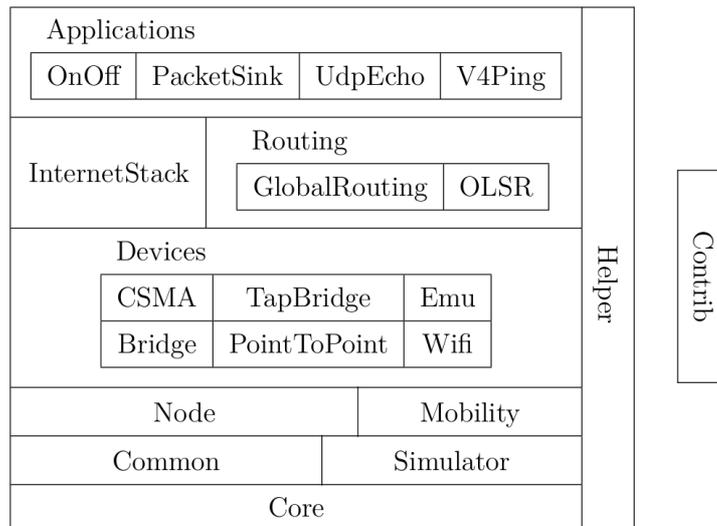


Figure 1.13 : Architecture en couches du simulateur NS-3.

La figure 1.13 présente les différents éléments de base de l'architecture en couche de NS-3. Le principe est le suivant : chacun des composants repose sur le programme de la couche immédiatement inférieure. Le composant « core » forme la base de chaque programme NS-3 en créant une structure de classe hiérarchique C++. Le composant « common » s'occupe de la simulation des paquets dans la simulation. Comme son nom l'indique, le composant « simulator » gère la simulation d'événements discrets et donc la gestion du temps. « Node » est bien entendu consacré aux nœuds de la simulation. Comme précisé précédemment, ce module copie les systèmes réels dans son fonctionnement. « Mobility » est le composant dédié à la mobilité et « device » celui aux interfaces des nœuds. Les couches 3 et 4 du modèle OSI sont gérées par le composant « internet stack ». La couche routage est gérée par le composant « routing » et la couche application par le composant « applications ». Enfin, le but du composant « helper » est de simplifier le codage des scénarios de simulation complexe, et le composant « contrib » contient tous les codes contributifs qui ne sont pas encore incorporés à l'architecture globale du simulateur NS-3.

GlomoSim

GlomoSim (*Global Mobile Information System Simulator*) a été développé en Californie dans le but principal de simuler les réseaux sans fil. GlomoSim est codé en Parsec [45] (un dérivé du C) et tous les ajouts au simulateur doivent être définis en Parsec également. Il existe aussi une version java du simulateur. GlomoSim est capable de gérer le SMP (*Shared Memory Symmetric*), c'est-à-dire l'accès à la mémoire simultanée par tous les programmes, ce qui permet de diviser le réseau en plusieurs modules s'exécutant chacun comme un processus indépendant. L'objectif est ici de réduire la charge du CPU en divisant la charge de travail. Grâce à cette fonction multitâche, le simulateur GlomoSim est capable d'exécuter des simulations ayant jusqu'à dix mille nœuds en simultané et permet ainsi le passage à l'échelle.

GlomoSim respecte aussi les couches du modèle OSI dans son architecture. Une riche librairie contenant différents protocoles et modèles est disponible pour chacune des couches. Contrairement à NS-2, GlomoSim inclut la possibilité de simuler les technologies de réseaux

sans fil multiples comme la norme IEEE802.11e [46]. Le logiciel offre en outre une riche panoplie de modèles de mobilité.

L'avantage principal de GlomoSim est sa capacité à simuler des réseaux de très grande taille grâce à sa technique de parallélisme. Son inconvénient principal vient du fait que la version libre du simulateur n'est plus mise à jour : GlomSim 2.0 date de 2000 [47]. Depuis, les travaux concernant le simulateur GlomoSim ont été stoppés au profit de la version commerciale du simulateur : QualNet.

Omnet++

L'environnement de simulation à événements discrets OMNeT++ est disponible gratuitement depuis 1997 [48]. OMNeT++ n'est pas un simulateur spécialisé pour un domaine particulier. Il a pour vocation d'être aussi généraliste que possible. Ainsi, OMNeT++ est utilisé dans de nombreux domaines, depuis les réseaux « peer-to-peer » jusqu'aux réseaux Ad Hoc en passant par la simulation de réseaux de stockage d'information. Ce logiciel a été développé pour fournir un simulateur puissant à événements discrets open source. L'objectif était à l'époque de créer une alternative entre le simulateur dédié à la recherche NS-2 et les alternatives commerciales coûteuses tel que le simulateur OPNET.

Le simulateur OMNeT++ est dédié à la modélisation des communications dans différents types de réseaux. Il utilise GCC ou Microsoft Visual++ comme compilateur en fonction de la plate-forme de simulation. Contrairement aux autres simulateurs, OMNeT++ ne propose pas de composants prédéfinis pour la simulation de réseau mais plutôt les outils permettant de créer ces composants. Il existe bien sûr de nombreux modules déjà implémentés, mais ils sont indépendants du simulateur de base et se développent (ou non) indépendamment de OMNeT++.

Un modèle OMNeT++ se compose de différents modules qui communiquent entre eux *via* des messages. Les modules actifs sont écrits en C++ et utilisent des bibliothèques dédiées à la simulation qui sont existantes. Ces modules peuvent être couplés entre eux de manière hiérarchique. Dans le langage de description de OMNeT++, l'utilisateur définit la structure du modèle qu'il souhaite simuler. Ce langage de description propre au simulateur s'appelle NED. On y trouve typiquement des déclarations de modules, des définitions des associations de modules et de réseaux.

OMNeT++ inclut un environnement de développement intégré contenant un éditeur graphique qui utilise le langage NED comme format de fichier. Comme NS-3, le simulateur peut également émuler une ou plusieurs parties d'un réseau. Il dispose aussi de la possibilité d'effectuer des simulations en temps réel et comporte des outils d'analyse de résultats.

1.2.2 Simulateurs de mobilité

On trouve deux types de simulateurs de mobilité : les simulateurs indépendants et les simulateurs intégrés. Les simulateurs indépendants génèrent uniquement la mobilité des réseaux VANETs. Il faut en général leur associer des outils pour pouvoir exploiter cette mobilité dans un simulateur de réseau Ad Hoc. Les simulateurs intégrés regroupent à la fois un simulateur de mobilité et un simulateur de réseau Ad Hoc, donc il n'y a pas de problème de compatibilité. Les sections suivantes présentent des exemples pour chacun des types de simulateurs. Une étude complète, dont le but est l'aide à la compréhension des techniques de simulation de mobilité, est présentée dans la référence [36].

SUMO

SUMO (Simulation of Urban Mobility) [49][50] est un simulateur de mobilité open source. Il fait partie des logiciels précurseurs du domaine et a ouvert la voie sur cette thématique. Il est complexe d'utilisation mais permet de générer de la mobilité sur une zone géographique de la taille d'une ville.

Le but premier de *SUMO* est de pouvoir générer une mobilité basée sur des critères de décision qui ne sont pas totalement aléatoires et qui imitent le comportement humain. Pour cela, *SUMO* intègre plusieurs éléments dont notamment : un modèle de conducteur (*Car-Driver Model*), un modèle de feux de croisement (*Traffic Lights*), et un format de fichier de sortie pour sauvegarder le résultat de la simulation de mobilité.

Le *Car-Driver Model* implémenté dans *SUMO* permet à chaque véhicule d'adapter sa vitesse en fonction des véhicules le précédant, évitant ainsi toute collision. Le *Traffic Lights* donne des règles d'arrêt au carrefour qui évoluent dans le temps. Le fichier de résultats inclut les points de départ avec les vitesses et destinations initiales pour chaque nœud, ainsi que toutes les modifications de comportement (changement de vitesse ou de destination). Ces modifications sont sauvegardées chronologiquement par rapport au temps simulé.

MOVE

MOVE (MObility model generator for VEhicular networks) [51] est une application Java basée sur *SUMO*. *MOVE* possède un très bon outil de visualisation. Il permet en outre de simplifier grandement la complexité du générateur de mobilité *SUMO* en quelques clics de souris, sans se préoccuper des détails du simulateur. *MOVE* peut créer des fichiers de mobilité à partir des bases de données *TIGER* [52] ou *Google earth*, mais il permet également de créer soi-même l'environnement de simulation ou de le générer aléatoirement.

On trouve aussi dans *MOVE* un éditeur de cartes ainsi qu'un éditeur de mouvements véhiculaires. L'éditeur de cartes permet de générer des cartes pour les scénarios et l'éditeur de mouvements permet de générer automatiquement le modèle de déplacement ou de le définir soi-même. La génération manuelle se fait sur la base de point d'attraction ou de répulsion.

Après avoir configuré les points de départ et d'arrivée, *MOVE* génère les parcours de manière aléatoire, ou bien en se basant sur les points d'attraction ou de répulsion. Le parcours

est le chemin entre le point de départ et d'arrivée le plus adapté en fonction des critères. L'algorithme de « Dijkstra » est le modèle mathématique le plus communément utilisé pour générer les parcours. La vitesse des nœuds est dépendante des routes qu'ils vont emprunter. Cependant, avec son éditeur de mouvement, *MOVE* dispose d'un moyen de découpage des résultats de simulation pour pouvoir les lire avec un simulateur de réseau Ad Hoc.

Bien qu'avantageux, *MOVE* n'inclut ni le changement de voie de circulation, ni les modèles de mobilité qui tiennent compte des obstacles sur la route. Il n'intègre pas non plus dans la simulation le mouvement aléatoire que peut avoir un véhicule, car la modélisation du comportement humain et l'interaction entre véhicules ne se font qu'au travers du modèle « car following ».

VanetMobiSim

VanetMobiSim [53] est une extension de *CanuMobiSim* [54]. Ce dernier est un simulateur de mobilité en *Java* qui peut générer des simulations de mobilité dans différents formats (*NS-2*, *GloMoSim*, *QualNet*, etc.). Il inclut également différents modèles de mobilité aléatoire ainsi que des modèles plus réalistes. Le problème de *CanuMobiSim* est qu'il ne peut être utilisé que dans certains environnements, à cause de son manque de modèles adaptés. Il n'est pas à même de fournir un grand niveau de détails dans certains scénarios spécifiques. *VanetMobiSim* vient compléter les lacunes de *CanuMobiSim*.

La modélisation des VANETs inclut des relations entre véhicules mais aussi entre véhicules et infrastructures. Au niveau mobilité, elle doit également inclure les panneaux *stop*, les feux de croisements et une mobilité basée sur l'activité humaine. *VanetMobiSim* regroupe tous ces éléments. Il permet aussi d'extraire des cartes des bases de données *TIGER* et *GDF*, ainsi que de créer des cartes manuellement ou aléatoirement.

Comme le précédent simulateur, *VanetMobiSim* permet de générer les parcours en fonction de points (ou de zone) d'attractions ou de répulsions. Le parcours entre le point de départ et d'arrivée peut être configuré sur la base de l'algorithme de « Dijkstra » (le plus court chemin) ou en fonction des routes les plus rapides ou encore en fonction de la densité du trafic. Tout comme son prédécesseur, *VanetMobiSim* permet de générer des résultats dans différents formats. Il est aussi très facile d'utilisation *via* son interface *Java* et un système de script aisé à prendre en main. Ce simulateur offre donc de bonnes performances, une flexibilité vis-à-vis du format des résultats pour le simulateur de réseau Ad Hoc et une prise en main rapide et intuitive.

1.2.3 Les simulateurs intégrés

Plusieurs solutions au problème d'interconnexion entre les simulateurs de mobilité et les simulateurs de réseau Ad Hoc existent [55]. La première consiste à rendre le format des résultats produits par le générateur de mobilité lisible par le simulateur de réseau. Cela n'est malheureusement pas toujours possible et il faut en général adapter les résultats de la simulation de mobilité spécialement pour le simulateur de réseau *via* des scripts spécifiques. Une autre solution consiste à utiliser un simulateur dédié VANETs qui intègre à la fois le

simulateur de mobilité et de réseau Ad Hoc, et qui donc, par nature, ne souffre pas de soucis d'interconnexion.

Le grand changement apporté par ces simulateurs par rapport aux autres simulateurs de réseau est le fait qu'ils associent les simulateurs de mobilité et de réseau Ad Hoc au sein d'une même structure. Ainsi, ces simulateurs peuvent être caractérisés de simulateur VANETs à proprement parler car ils intègrent chacun des éléments nécessaires à la simulation.

TraNS

TraNS (*Traffic and Network Simulator environment*) [56] est une application *Java* munie d'un outil de visualisation, qui a été créée pour la simulation VANET avec l'objectif d'intégrer *SUMO* et *NS-2*. Il s'agit en fait d'une sur-couche à ces deux simulateurs. Il faut noter que *TraNS Lite* est la version de *TraNS* indépendante qui génère uniquement la mobilité sans avoir recours à *NS-2*. *TraNS* peut simuler jusqu'à 3000 nœuds. Il est aussi capable de se servir de la base de données *TIGER*.

L'interface TraCI (*Traffic Control Interface*) [57] combine *TraNS Lite* avec *NS-2*. Cette approche intègre donc deux des simulateurs les plus utilisés en terme de mobilité et de réseaux Ad Hoc dans un même simulateur VANET, l'objectif étant de faciliter la simulation. Le fichier de trafic généré par *SUMO* est donc transféré automatiquement dans *NS-2*, puis la simulation de réseau Ad Hoc s'effectue dans *NS-2* avec la mobilité issue de *SUMO*.

NCTUns

Le simulateur NCTUns (*National Chiao Tung University Network Simulator*) a été proposé par S.Y. Wang en 2002 [58]. *NCTUns* est écrit en *C++* et dispose d'une interface graphique très développée. Tout comme *TraNS*, il associe les simulateurs de mobilité et de réseau Ad Hoc au sein d'une même structure.

NCTUns dispose de nombreux outils performants et faciles à prendre en main. L'outil graphique de visualisation de *NCTUns* est intuitif et très ergonomique. Il permet de générer beaucoup d'éléments que ce soit au niveau du générateur de trafic ou des contraintes de mouvements. On trouve aussi plusieurs modèles de parcours disponibles.

Le fonctionnement interne de NCTUns est très complexe et, bien que l'interface soit facile d'accès et très intuitive, la lecture et la modification du code source sont très difficiles. Par exemple, au niveau de la couche physique du modèle OSI, NCTUns inclut plusieurs modèles de propagation et leur utilisation est pratique et instinctive. En revanche, l'intégration de nouveaux modèles est délicate à accomplir sans mettre en danger la structure du simulateur.

L'avantage principal de NCTUns pour la simulation de réseaux VANETs est l'association des éléments nécessaires à la simulation intégrée dans le simulateur de base, depuis le simulateur de mobilité jusqu'aux outils d'analyse des résultats. Cependant, peu de recherches utilisent ce simulateur et, tout comme GlomoSim, NCTUns n'est plus open source (dernière version disponible 7.0). Au printemps 2012, EstiNet est officiellement devenu le successeur payant de NCTUns.

1.3 Vers des simulations VANETs réalistes

Dans les sections précédentes, nous avons présenté les aspects auxquels il faut attacher une importance particulière si l'on souhaite réaliser des simulations de réseaux véhiculaires avec un minimum de réalisme [59]. Ce réalisme est d'une grande importance car :

- les expérimentations réelles de réseaux véhiculaires sont coûteuses, tant en ressources techniques (véhicules, appareils de mesure, systèmes de communication, etc.) qu'humaines (conducteurs, assistance technique, etc.). C'est pourquoi le recours à la simulation s'impose comme une nécessité.
- les contraintes liées à la mobilité des véhicules (changements rapides de topologie, effets de la vitesse, etc.) ainsi qu'à l'environnement dans lequel ils évoluent, ne sont pas facilement reproductibles. Cela est par ailleurs un pré-requis pour des études dans lesquelles la plupart des investigations et analyses se font de manière statistique.

Les réseaux véhiculaires s'appuient sur un support de communication dont les caractéristiques et performances sont très versatiles, ce qui peut, par exemple, se traduire par des liens dont non seulement la qualité peut être très variable au cours du temps mais aussi dont l'existence même de ces liens peut être tout à fait sporadique.

Les applications envisagées ont un spectre très étendu. Elles vont de la diffusion d'informations de sécurité à, pourquoi pas, le visionnage d'une vidéo dont la source est située trois véhicules plus loin. Cela nécessite en tout cas de mettre en œuvre une certaine qualité de services qui pourra être exploitée par les applications en fonction de leurs besoins spécifiques.

Qualité de service et approche cross-layer

La notion de Qualité de Service (QoS – Quality of Service) dans les réseaux informatiques est une notion assez générale qui peut recouvrir bien des aspects techniques dans les réseaux. La définition que l'on peut en trouver dans Wikipedia, "*La QoS est la capacité à véhiculer dans de bonnes conditions un type de trafic donné, en termes de disponibilité, débit, délais de transmission, gigue, taux de perte de paquets...*", nous apparaît comme une bonne approche.

On retrouve d'ailleurs une majorité de ces éléments dans la référence [60] dans laquelle les critères pris en compte pour qualifier/quantifier la qualité des transmissions sont : la capacité de transport, le délai de transmission ou encore les pertes de paquets. Dans cet article [60], ces indicateurs utilisés sont issus directement de la couche physique. Néanmoins, la QoS peut très bien être associée à des mécanismes agissant à d'autres niveaux du modèle de référence, et plus particulièrement au niveau application comme dans le papier [61]. Les auteurs utilisent comme critère la taille du meilleur paquet vidéo à transmettre pour déterminer le chemin de routage. En fonction de la taille de ce paquet, le protocole choisit une route ou une autre.

Nous avons vu précédemment que les communications véhiculaires prennent appui sur un support de communication versatile. Les caractéristiques changeantes de ce média s'expriment donc au travers de paramètres de la couche physique tels que la probabilité de coupure, le taux d'erreurs binaires, la puissance de réception, etc... Dans le paradigme habituel

des réseaux, c'est-à-dire le modèle en couches, chaque couche offre un service à la couche du dessus et il n'y a pas d'interaction possible/prévue entre les couches. Améliorer le service offert par une couche à une couche supérieure revient donc très souvent à mettre en œuvre dans cette couche supérieure des mécanismes qui lui sont propres. En outre, ils doivent fonctionner sans informations disponibles sur l'état de couche inférieure, dans laquelle se produit le phénomène dont on veut limiter l'impact négatif sur l'ensemble de la communication.

L'application de cette méthode de conception aux protocoles de routage dont l'objectif est d'aiguiller des paquets de données d'une source à une destination au travers du maillage constitué de véhicules relais, peut amener à des situations telles que :

- en cas de disparition d'un lien entre deux relais, il est nécessaire d'attendre l'impact sur le protocole de routage, c'est-à-dire qu'un paquet ne puisse plus être acheminé, pour déclencher un mécanisme de réparation ;
- lors de la découverte de routes, les messages utilisés ont une taille assez faible qui ne nécessite pas de performance particulière de la couche physique pour les acheminer, alors que les paquets de données pour lesquels ils ouvrent la voie sont bien souvent plus gros et nécessitent donc des performances plus élevées afin d'être transportés sans nécessiter plusieurs réémissions pour les acheminer au prochain saut.

Ces deux exemples illustrent le fait que la mise à disposition au niveau du routage d'éléments/paramètres de la couche physique, tels que le taux d'erreurs binaires et la puissance de réception, permettrait d'apporter des améliorations en amont. Par exemple, en faisant une recherche de route qui prendrait en compte la taille des données à transporter, d'anticiper une défaillance afin d'enclencher de manière préventive un mécanisme de réparation et ainsi éviter le temps de latence nécessaire à une recherche de route.

La technique du *cross-layer* que nous venons d'introduire ici apparaît donc comme une technique prometteuse pour apporter de la qualité de services dans les réseaux véhiculaires. Une amélioration attendue concerne la diminution de la quantité de messages nécessaires à la supervision par les protocoles de routage. Une autre concerne le contrôle de la versatilité des liens physiques diminuant le taux d'erreur en permettant de choisir des chemins robustes.

Positionnement scientifique de la thèse

L'objectif de cette thèse est double et concerne des domaines très différents mais pourtant intimement liés. Nous avons d'abord expliqué que l'impact de conditions de simulation réalistes sur des communications véhiculaires n'est pas négligeable et dégrade généralement assez fortement les performances observées dans des conditions non réalistes. Il faut donc disposer d'un outil de simulation qui permette d'apporter du réalisme là où les communications véhiculaires ont leurs spécificités.

La modélisation des déplacements véhiculaires ayant donné lieu à de nombreux travaux et atteint un niveau qui peut être jugé comme satisfaisant, nous nous focalisons sur la modélisation de la propagation des ondes dans les milieux habituellement fréquentés par les véhicules. Une contribution sous la forme d'un modèle de propagation semi-déterministe intégré à un simulateur de réseau, le tout associé à un simulateur de mobilité, est le premier

challenge permettant de disposer d'un outil complet et réaliste de simulations pour réseaux véhiculaires.

Ce travail s'est inscrit dans un contexte de collaboration entre les laboratoires MIPS-GRTC de l'Université de Haute Alsace et XLIM-SIC de l'Université de Poitiers. Notre contribution s'appuie sur des travaux antérieurs au sein de ces laboratoires [5] et est exposée dans le chapitre 2 de cette thèse.

L'atteinte du premier objectif de cette thèse montrera l'impact négatif de conditions réalistes d'évaluation des performances des communications multi-sauts inter véhicules par rapport à une approche classique. Nous étudierons alors des mécanismes permettant d'améliorer ces performances. Nous explorerons le domaine du routage en prenant en compte des paramètres de la couche physique dans certains mécanismes du protocole de routage. Nous évaluerons l'impact de cette démarche cross layer sur les trois métriques principales des réseaux sans fil que sont la perte de paquets, le délai de bout en bout et l'overhead de routage. Ces travaux sont présentés dans le chapitre 3 de cette thèse.

Positionnement technique de la thèse

L'un des objectifs de cette thèse est la mise en œuvre d'une plate-forme de simulation réaliste VANET. De par sa grande flexibilité et l'immense base d'informations que constituent tous les travaux de la communauté scientifique (y compris ceux du laboratoire), le simulateur de réseau NS-2 s'est imposé pour cette thèse. Ce simulateur permet grâce à son caractère open source, d'utiliser divers travaux existants aussi bien au niveau modélisation de la couche physique, qu'au niveau des protocoles de routage pour pouvoir orienter des recherches axées sur une démarche cross layer.

Ensuite, bien que l'ensemble des phénomènes de la propagation des ondes soient connus, la modélisation du canal de propagation dédiée pour les simulateurs de réseaux VANETs est un vaste domaine de recherche actif. Il existe beaucoup de propositions pour pallier ce manque, et ce en provenance de différentes communautés scientifiques, avec différentes méthodes et pour différents simulateurs. Le problème réside dans le fait que l'utilisation de modèles non adaptés aux VANETs peut engendrer des erreurs dans la simulation, comme le montre la référence [62]. D'autre part, il reste très difficile de trouver des modèles de canal VANET efficaces et robustes qui prennent en compte la mobilité et particulièrement l'environnement de propagation. La question du choix du modèle de propagation et de la couche physique n'est pas tranchée, et elle représente une des contributions de cette thèse présentée dans le chapitre 2.

Concernant le choix des protocoles à étudier, des travaux antérieurs [63] ont été menés sur le sujet. Il faut pouvoir effectuer des comparaisons vis-à-vis de ces travaux. Ainsi, bien que les simulations se soient tout d'abord focalisées sur le protocole de routage réactif AODV, le chapitre 3 présente et analyse les performances de plusieurs protocoles de routage topologiques avec pour objectif d'optimiser la QoS.

Enfin, le simulateur de mobilité utilisé durant cette thèse est VanetMobiSim [53]. Il s'est imposé de par sa compatibilité avec NS-2, et sa facilité de prise en main combinée à son grand réalisme.

Conclusion

Ce chapitre a tout d'abord présenté les principes des réseaux sans fil et des réseaux VANETs, ainsi que le concept du modèle OSI. Ensuite, les différentes briques de base nécessaires à la simulation des VANETs ont été développées, depuis les bases fondamentales sur lesquelles s'appuie toute analyse électromagnétique, jusqu'aux méthodes de modélisation de la mobilité, en passant par les mécanismes de routage.

La nécessité d'utiliser conjointement un simulateur de mobilité avec un simulateur de réseaux et un modèle de propagation, afin de pouvoir effectuer des simulations de réseaux VANETs réalistes, a été explicitée. Il faut un simulateur réseau capable de prendre en charge la mobilité associée à une modélisation de la couche physique réaliste et efficace en temps de calcul. Ces trois éléments doivent être choisis et combinés avec la plus grande rigueur pour former une plate-forme de simulation VANET efficace et réaliste car il n'existe aucun standard faisant l'unanimité dans le domaine.

Enfin, le positionnement de la thèse par rapport aux outils et travaux existants, ainsi qu'aux approches à développer, a été explicité.

Bibliographie

- [1] G. Marfia, G. Pau, E. De Sena, "Evaluating Vehicle Network Strategies for Downtown Portland: Opportunistic Infrastructure and the Importance of Realistic Mobility Models", MobiOpp'07, San Juan, Puerto Rico, USA, June 11, 2007.
- [2] A. Jardosh, E. Belding-Royer, K. Almeroth, and S. Suri, "Toward realistic mobility models for mobile ad hoc networks", MobiCom 2003, San Diego, CA, 2003.
- [3] G. Pujolle, "Les réseaux", 6ème édition, Eyrolle, Paris, 2007.
- [4] M. Gast, Traduction d'Hervé Soulard, "802.11 Réseaux sans fil: La référence", Seconde édition, Editions O'Reilly, Paris, 2005.
- [5] <http://theses.edel.univ-poitiers.fr/theses/2010/Hamidouche-Wassim/2010-Hamidouche-Wassim-These.pdf>
- [6] C. Siva Ram Murthy, B.S. Manoj, "Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols", Pearson Education, 2004.
- [7] B. Jarupan, E. Ekici, "A survey of cross-layer design for VANETs", Elsevier Ad Hoc Networks Journal, volume 9, pages 966–983, 2011.
- [8] E. Setton, T. Yoo, X. Zhu, A. Goldsmith, B. Girod, "Cross-Layer design of Ad Hoc Networks for real-time video streaming", IEEE Wireless Communications Journal, volume 12, pages 59-65, 2005.
- [9] D. Dessales, "Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation", PHD Thesis, University of Poitiers, France, 2011.
- [10] P.A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels", IEEE Transaction on Communications Systems, volume 11, pages 360–393, 1963.
- [11] C. Pereira, "Etude avancée des canaux de transmission radio en contexte MIMO : environnements complexes et couplage inter-antennes très large bande", PHD Thesis, University of Poitiers, France, 2008.
- [12] "IEEE Standard for information technology - Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements", Part 11: Wireless LAN Medium Acces Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE std 802.11p, 2010.
- [13] S. Lin, D. J. Costello Jr., "Error Control Coding : Fundamentals and Applications", second edition, Prentice Hall : Englewood Cliffs, NJ, 2004.
- [14] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajhima, "Near shannon limit error correcting coding and decoding : Turbo-codes", Proceedings of International Conference on Communications (ICC 93), Switzerland, 1993.
- [15] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes", Ph.d. report, M.I.T. Press, Cambridge, U.S.A., 1963.
- [16] P. Elias, "Coding for noisy channels", Proceedings of the IRE National Convention, Mar. 1955.
- [17] <http://fr.wikipedia.org/wiki/CSMA/CA>
- [18] I. Stepanov, K. Rothermel, "On the impact of a more realistic physical layer on MANET simulations results", Elsevier Ad Hoc Networks Journal, pages 61–78, 2008.
- [19] H.H. Yao, H.H. Ai, A.H. Kien, "Routing protocols for inter-vehicular networks: A comparative study in high-mobility and large obstacles environments", Computer communications, volume 31, July 2008.
- [20] B. Paul, M. Ibrahim, M. A.N. Bikas, "VANET Routing Protocols: Pros and Cons", International Journal of Computer Applications, 2011.

- [21] K.C. Lee, U. Lee, M. Gerla, "Survey of Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks", *Advances in Vehicular Ad Hoc Networks : Developments and Challenges*, IGI Global, 2010.
- [22] F. Li, Y. Wang, "Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, volume 2, pages 12-22, 2007.
- [23] C. Perkins, P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", *ACM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, SIGCOMM*, pages 234- 244, London, 1994.
- [24] T.W. Chen, M. Gerla, "Global State Routing : A New Routing Scheme for Ad-hoc Wireless Networks", *IEEE Internal Conference on Communications, ICC*, pages 171-175, 1998.
- [25] M. Joa-NG, I.T. LU, "A Peer-to-Peer zone-based two-level link state routing for mobile Ad-hoc Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Ad-Hoc Networks*, pages 1415-1425, 1999.
- [26] C.E. Perkins, E.M. Blkding-Royer, "The Ad Hoc on-demand distance-vector protocol", *Ad Hoc Networking*, pages 173-219, Addison-Wesley Longman Publishing Co., 2001.
- [27] D. Onhson, D. Maltz, J. Broch, "DSR: The dynamic source routing protocol for multihop wireless Ad Hoc networks", *Ad Hoc networking*, pages 139-172, 2000.
- [28] J.Z. Haas, "A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks", *IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications Record*, volume 2, pages 562-566, 1997.
- [29] J. Mingliang, L. Jinyang, C.T. Yong, "Cluster Based Routing Protocol (CBRP)", 1998.
- [30] S. Besagni, I. Chlamtac, V.R. Syrotiuk, B.A. Woodward, "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)", *MOBICOM*, 1999.
- [31] M. Günes, M. Wenig, A. Zimmermann, "Realistic Mobility and Propagation Framework for MANET Simulations", *Proceedings of the 6th International Conference on Networking, Atlanta, Georgia, USA*, 2007.
- [32] G. Zhang, "Geocast Routing in Urban Vehicular Ad Hoc Networks", *Computer and Information Science, Verlag Springer*, pages 23-31, 2009.
- [33] W-H. Liao, "GeoGRID : A Geocasting Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Based on GRID", *Journal Internet Technology*, pages 23-32, 2000.
- [34] J. Camp, J. Boleng, V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research", *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2002.
- [35] J. Haerri, M. Fiore, F. Filali, C. Bonnet, C. Casetti, "A realistic mobility simulator for vehicular ad hoc networks", *Research Report RR-05-150*, 2005.
- [36] J. Harri, F. Filali, C. Bonnet, "Mobility models for vehicular Ad Hoc networks: a survey and taxonomy", *Communications Surveys & Tutorials Journal* vol.11, pages 19-41, 2009.
- [37] M. Piorowski, M. Raya, A. Lezama Lugo, P. Papadimitratos, M. Grossglauser, J.-P. Hubaux, "TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs", *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2008.
- [38] L. Bölöni, D. Turgut, "YAES: a modular simulator for mobile networks", *8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, MSWiM '05*, 2005.
- [39] M. Sánchez, P. Manzoni, "ANEJOS: a Java based simulator for ad hoc networks", *Future Generation Computer Systems Journal*, volume 17, pages 573-583, 2001.
- [40] <http://www.opnet.com/>

- [41] <http://www.qualnet.fr/>
- [42] S. Olariu, M.A.C. Weigle, “Vehicular Networks: From simulator for VANETs”, Theory to Practice, 2009.
- [43] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [44] <http://www.nsnam.org/>
- [45] R. Bagrodia, R. Meyer, M. Takai, Y. Chen, X. Zeng, J. Martin, and H. Y. Song. “Parsec: A parallel simulation environment for complex systems”, Computer Journal vol. 31, pages 77-85, 1998.
- [46] J. Farooq, B. Rauf “Implementation and Evaluation of IEEE 802.11e Wireless LAN in GlomoSim”, Master Thesis, Department of Computing Science Umeå University, Sweden, 2006.
- [47] http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/obtaining_glomosim.html
- [48] <http://www.omnetpages.org/>
- [49] <http://sumo.sourceforge.net/>
- [50] D. Krajzewicz, G. Hertkorn, P. Wagner, C. Rössel, “SUMO (Simulation of urban mobility)”, Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM), 2002.
- [51] http://lens.csie.ncku.edu.tw/Joomla_version/index.php/research-projects/past/18-rapid-vanet
- [52] <http://www.census.gov/geo/www/tiger/>
- [53] <http://vanet.eurecom.fr/>
- [54] <http://canu.informatik.uni-stuttgart.de/mobisim/>
- [55] A. Hassan, T. Larsson, “On the requirements on models and simulator design for integrated VANET Simulation”, International Workshop on Intelligent Transportation, pages 191-196, 2011.
- [56] M. Piorowski, M. Raya, A. Lezama Lugo, P. Papadimitratos, M. Grossglauser, J.-P. Hubaux, “TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs”, SIGMOBILE, January 2008
- [57] <http://apps.sourceforge.net/mediawiki/sumo/index.php?title=TraCI>
- [58] <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>
- [59] H. Hartenstein, K.P. Laberteaux, “VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies”, Intelligent Transportation Systems, Wiley, 2012.
- [60] G. Chauhan, S.Nandi, “QoS Aware Stable Path Routing (QASR) Protocol for MANETs”, 1st International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), pages 202-207, 2008.
- [61] I.A McDonald, R. Nelson, “Application-level QoS: Improving video conferencing quality through sending the best packet next”, International Journal of Internet Protocol Technology, pages 24-31, 2009.
- [62] F.J. Martinez, C.K. Toh, J.C. Cano, C.T. Calafate, P. Manzoni, “Realistic Radio Propagation Models (RPMs) for VANET Simulations”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2009, 2009.
- [63] J. Ledy, H. Boeglen, B. Hilt, A. Abouaissa, R. Vauzelle, “An enhanced AODV protocol for VANETs with realistic radio propagation model validation”, Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), 2009.

Chapitre 2 - Un modèle de couche physique semi-déterministe pour les VANETs

Introduction

L'étude par simulation des réseaux VANETS (Vehicular Ad-hoc NETWORKS) est un enjeu majeur pour le développement de ces systèmes, compte-tenu des investissements nécessaires à la réalisation de démonstrateurs réels de tests.

Günes et al. [1] ont montré que la combinaison d'un simulateur de réseaux, d'un simulateur de mobilité et d'un modèle de couche physique réaliste (propagation des ondes et communications numériques) est fondamentale pour réaliser des simulations réalistes. Des simulateurs de mobilité efficaces dans le domaine des VANETS, ainsi que des simulateurs réseaux Ad Hoc performants intégrant cette mobilité, ont été présentés dans le chapitre précédent. Malheureusement, il n'en va pas de même pour la couche physique de ces simulateurs. Développer un modèle de propagation qui décrirait les conditions réelles du canal de manière aussi précise que possible, avec un temps de calcul raisonnable, reste toujours un défi.

Plusieurs recherches étudient l'effet du modèle de propagation sur les simulations VANETS [2][3]. La conclusion de ces recherches souligne l'importance de l'impact du modèle sur les résultats de simulation. L'une de ces recherches prend en compte les améliorations de la norme dédiée au réseau VANET, la norme 802.11p [2], et affirme également la nécessité d'un modèle réaliste de canal pour les simulations VANETS.

Pour la téléphonie mobile, il existe des modèles fiables et paramétrables en fonction de l'environnement tel que [4]. Pour les VANETS, on trouve encore peu de modèles de canaux efficaces et robustes qui prennent en compte la mobilité dans un environnement particulier de transmission. Les difficultés sont liées à la forte mobilité, à la diversité des situations et au nombre très important de liens possibles.

Les travaux [5] et [6] décrivent des modèles de canaux déterministes, basés sur des techniques de tracé ou de lancer de rayons qui fournissent une modélisation réaliste du canal. Ces techniques se révèlent cependant très coûteuses en temps de calcul.

Dans le contexte des VANETS, un modèle de propagation performant doit ainsi résulter d'un compromis entre le réalisme et le temps de calcul acceptable dans le cadre d'une simulation bien plus vaste de type réseaux et dont la topologie peut évoluer très rapidement. Plusieurs propositions ont été apportées par la communauté scientifique pour répondre à ce défi. Cette thèse s'inscrit dans cette démarche. La contribution majeure développée dans ce chapitre porte sur un modèle de propagation semi-déterministe intégré dans un modèle de couche physique réaliste, lui-même implémenté dans le simulateur de réseau NS-2.

Ce chapitre se décompose de la manière suivante. Différentes propositions de modèles de canaux existants sont tout d'abord présentées, depuis des modèles simples voire simplistes en espace libre, jusqu'à des modèles géométriques très riches. Notre contribution portant sur la conception d'une couche physique réaliste reposant sur un modèle semi-déterministe est ensuite explicitée en détails. Finalement, une analyse des performances de notre proposition au sein du simulateur NS2 par rapport à l'existant vient conclure ce chapitre.

2.1 Modèles de canaux

La propagation des ondes obéit à une multitude de phénomènes qui dépendent essentiellement de l'environnement de propagation, de la fréquence utilisée et du déplacement de l'émetteur et/ou du récepteur. Ces phénomènes entraînent des variations du canal de propagation qu'il est important de modéliser pour en considérer les impacts sur le signal reçu.

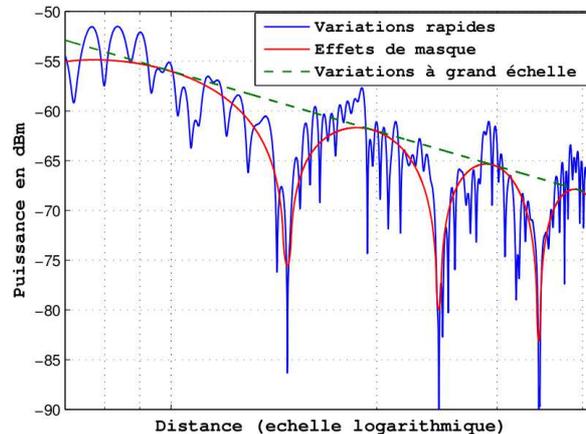


Figure 2.1 : Illustration des variations de la puissance reçue en fonction de la distance [7].

A travers la *figure 2.1*, on distingue trois échelles de variations du signal :

- Les variations à grande échelle (« path loss ») représentent l'affaiblissement lié à la distance séparant l'émetteur et le récepteur.
- L'effet de masquage (« shadowing ») représente les variations lentes du signal dues aux interactions avec les obstacles de l'environnement, souvent modélisées par une loi Log-normale.
- Les variations à petite échelle (« fading ») représentent les fluctuations rapides du signal liées aux interférences constructives et destructives entre les différents trajets. Le signal reçu peut alors varier de plusieurs dizaines de dB autour de la médiane locale du signal. Ce type de phénomène est la conséquence directe du phénomène de multi-trajets et de la variabilité spatio-temporelle.

Ces phénomènes doivent être pris en compte pour pouvoir caractériser le plus fidèlement possible le canal de propagation. Or, l'un des problèmes majeurs dans la simulation des réseaux VANETs concerne l'environnement de simulation et la modélisation réaliste du canal de propagation. C'est donc avec la plus grande rigueur qu'il faut choisir un modèle de propagation dédié aux VANETs.

Nous pouvons distinguer plusieurs grandes familles de modèles de propagation. Les modèles empiriques sont basés sur des phénomènes physiques et intègrent plusieurs hypothèses simplificatrices. Les modèles déterministes sont plus sophistiqués. Ils présentent l'avantage de pouvoir intégrer des environnements complexes connus avec précision. Enfin, il existe les modèles statistiques qui sont basés soit sur des distributions statistiques, soit sur des éléments géométriques placés dans l'environnement représentant des diffuseurs. Cette partie est dédiée à l'étude de ces modèles de propagation.

2.1.1 Modèles empiriques

Le cas idéal correspond à la propagation en espace libre. Ce modèle de propagation permet de représenter facilement les variations à grande échelle du canal. Il calcule la puissance reçue dans le cas d'une transmission idéale, c'est-à-dire un émetteur et un récepteur en visibilité directe dans un espace vide. Le canal ne présente ainsi que le trajet direct.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

Le rapport entre la puissance reçue au niveau du récepteur et la puissance transmise par l'émetteur en espace libre est modélisé par l'équation 2.1, aussi appelée équation de Friis où :

- G_t est le gain de l'antenne d'émission
- G_r est le gain de l'antenne de réception
- P_t est la puissance en Watt (W) délivrée à l'antenne d'émission
- P_r est la puissance en Watt (W) collectée sur l'antenne de réception
- d est la distance en mètres (m) séparant les deux antennes
- λ est la longueur d'onde en mètres (m)

On constate avec l'équation 2.1 que le niveau de puissance reçue pour une transmission donnée dépend uniquement de la distance séparant l'émetteur et le récepteur, et de la fréquence de transmission (cf. figure 2.2).

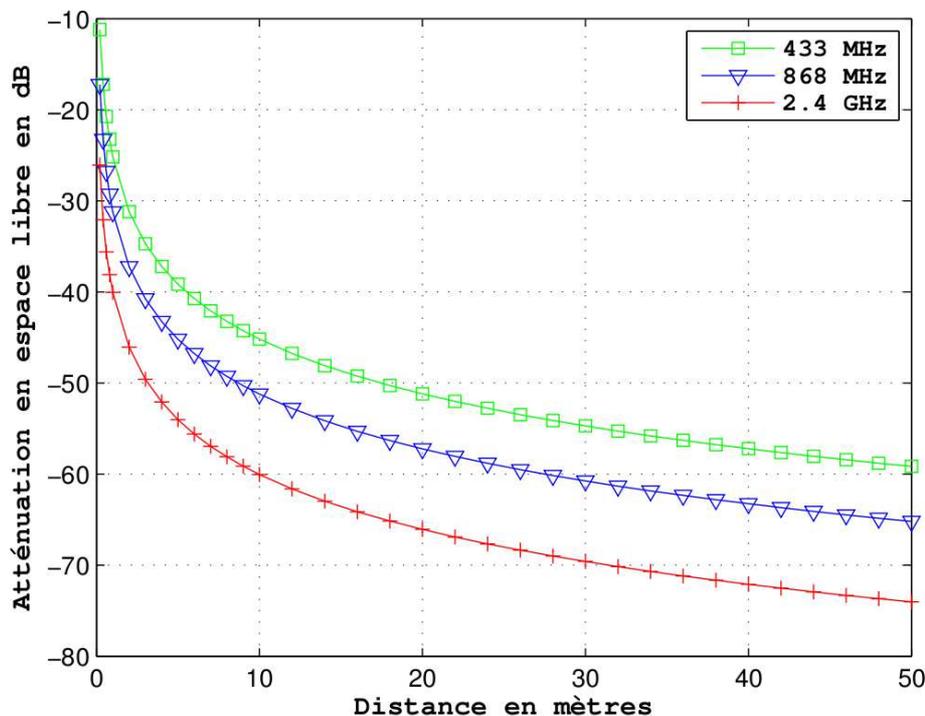


Figure 2.2 : Atténuation en espace libre en fonction de la distance et de la fréquence [7].

Il s'agit du modèle le plus simple, très souvent utilisé dans la communauté des réseaux, notamment parce que les temps de calcul associés sont extrêmement faibles. Cependant ce modèle de propagation ne permet pas à lui seul de donner des résultats réalistes dans un contexte VANET.

Une évolution du modèle en espace libre, le modèle de propagation à deux rayons [8], ne prend pas non plus en compte les paramètres de l'environnement, mais il ajoute une interaction à la modélisation de la propagation des ondes : la réflexion de l'onde sur le sol. Ce modèle donne des résultats acceptables en termes de réalisme pour des environnements de type autoroute, ou bien encore des environnements de type rural. En effet, ces milieux contiennent peu d'obstacles, et la réflexion sur le sol est la seule interaction majeure que l'onde subit. Malheureusement, dans un contexte VANET urbain, le modèle de propagation à deux rayons ne donne pas de résultats plus réalistes que le modèle en espace libre.

Une variante plus avancée du modèle en espace libre, le modèle à exposant, modélise l'influence de l'environnement à travers une composante β , qui est fixée empiriquement en fonction de l'environnement de propagation. Pour un environnement vide (en espace libre), β est égal à 2. Pour les réseaux mobiles Ad Hoc, on considère généralement deux valeurs de β à savoir 2.5 et 2.7 pour un environnement urbain [9]. Ainsi, lorsque la composante β est adaptée à l'environnement, le modèle offre un comportement assez réaliste d'un point de vue macroscopique. Ainsi, le modèle à exposant est basé sur le modèle en espace libre auquel est ajoutée une atténuation supplémentaire liée aux caractéristiques de l'environnement de propagation.

La puissance reçue calculée avec les modèles empiriques ne dépend que de la distance entre l'émetteur et le récepteur, voire d'une caractéristique statistique de la densité de l'environnement. Ainsi, la puissance calculée, à une distance donnée par ces modèles, est la même dans toutes les directions alors qu'en réalité, elle dépend de la position de l'émetteur et du récepteur par rapport aux différents obstacles dans l'environnement. Une couche physique basée sur les modèles de propagation empiriques ne correspond pas suffisamment aux besoins des simulations VANET. En effet, pour modéliser la propagation de manière réaliste, il est nécessaire de prendre en compte explicitement l'impact des spécificités de l'environnement sur la propagation. Les modèles déterministes présentés ci-dessous répondent à cet objectif.

2.1.2 Modèles déterministes

Les modèles déterministes découlent des équations de Maxwell. Ils considèrent une description précise de l'environnement et de l'onde émise. Leur mise en œuvre est complexe mais offre une description complète des ondes reçues. Il existe deux classes de modèles déterministes. La première est celle des modèles dits exacts, dont le principe s'appuie sur une discrétisation des équations de Maxwell. La deuxième est celle des modèles dits asymptotiques, dont le principe est un développement asymptotique en fréquence des solutions des équations de Maxwell.

2.1.2.1 Modèles exacts ou à formulation rigoureuse

Les modèles exacts sont issus des méthodes qui consistent à résoudre les équations de Maxwell sous forme différentielle ou intégrale. Depuis les années 60, plusieurs méthodes rigoureuses ont été élaborées. Elles peuvent être distinguées en deux familles : les méthodes temporelles et les méthodes fréquentielles. Par exemple, la méthode des différences finies [11] permet de résoudre les équations de Maxwell sous forme différentielle, et la méthode des moments [12] permet de résoudre les équations de Maxwell sous forme intégrale.

Dans le contexte de VANETs, l'utilisation de ces méthodes est impossible. En effet, les méthodes temporelles nécessitent un maillage de l'environnement avec un pas spatial lié à la longueur d'onde λ , généralement $\lambda/10$ pour une bonne stabilité numérique des algorithmes. Par exemple, avec un nombre de mailles égal à 1 million, on a un volume cubique d'étude dont chaque côté mesure 10λ . Pour une fréquence de 2 GHz, cela correspond à une longueur de 1,4 mètres pour chaque côté, ce qui est extrêmement faible (comparativement aux besoins des milieux VANETs). Avec les méthodes fréquentielles, les dimensions des matrices à traiter sont fonction de la complexité de la structure à analyser, c'est-à-dire immense dans le contexte VANET. L'utilisation de ces méthodes est ainsi impossible à cause de l'outil informatique.

2.1.2.2 Modèles asymptotiques en fréquence

Les modèles asymptotiques ont été développés pour répondre à des problèmes de grandes envergures comme la simulation de la propagation des ondes électromagnétiques dans des environnements urbains. Leurs principes ainsi qu'un exemple d'un modèle à tracé de rayons sont explicités ci-dessous.

Principes des modèles asymptotiques

Les modèles à rayons reposent sur un développement asymptotique en fréquence des solutions des équations de Maxwell. La méthode utilisée est l'Optique Géométrique [13] qui décrit les champs directs, réfléchis et transmis avec le concept de rayons. Cette méthode est complétée par la Théorie Uniforme de la Diffraction [14] qui introduit le phénomène de diffraction. Ainsi, l'Optique Géométrique et ses extensions permettent une recherche des trajets radioélectriques suivis par l'onde et une détermination de leurs caractéristiques.

Les modèles à rayons permettent ainsi de prédire le comportement de l'onde dans des environnements non limités en dimension. La limite de ces modèles se situe dans la description de l'environnement (nombre de faces, arêtes, etc.). Il est ainsi possible de concevoir des logiciels de simulation du canal de propagation avec des méthodes de recherche, pour identifier les trajets qui se propagent entre un émetteur et un récepteur, et permettre ensuite la détermination d'une réponse impulsionnelle (RI) du canal.

Il y a deux familles de techniques de recherche de trajets : le lancer et le tracé de rayons.

Le lancer de rayons consiste à tirer des rayons selon un pas angulaire constant depuis la source et à identifier ceux qui interceptent un volume de réception après propagation dans l'environnement. Le principe de cette technique est basé sur l'algorithme SBR (Shooting and

Bouncing Rays) [15]. Dans un premier temps, l'environnement est inondé de rayons partant de l'émetteur. Ensuite, selon le parcours de chaque rayon et en considérant la géométrie et les propriétés électriques des matériaux rencontrés, l'algorithme détermine les différentes interactions électromagnétiques (réflexion, diffraction, réfraction) entre les rayons et les obstacles de l'environnement. Seuls les trajets intersectant la sphère de réception du récepteur sont retenus dans le calcul. Ainsi, un unique lancer de rayons permet de produire des résultats pour une infinité de positions de récepteurs. La précision des résultats dépend alors du nombre de rayons à lancer, du pas angulaire choisi pour couvrir l'environnement, et de la taille de la sphère de réception. Malheureusement, de par son principe même de recherche, cette technique n'exclut pas la possibilité de manquer certains trajets importants.

La méthode de tracé de rayons [16] s'avère, quant à elle, souvent plus précise car elle prend en compte tous les trajets de propagation possibles entre un émetteur et un récepteur, pour un nombre d'interactions maximum fixé. La recherche des rayons qui peuvent se propager d'un émetteur vers un récepteur est basée sur la méthode des images et celle du pliage [17]. De plus, en prenant en compte les propriétés électriques des matériaux, la méthode de tracé de rayons permet de déterminer l'atténuation de chacun des trajets causée par les interactions de l'onde avec les obstacles. Cependant, et contrairement au modèle à lancer de rayons, l'utilisation de ce type de modèle nécessite de recourir à une simulation pour chaque configuration d'émetteur-récepteur. Ainsi, plus il y a de configurations émetteur-récepteur, et plus cette méthode est coûteuse en temps de calcul, en particulier lorsque le nombre d'interactions considéré est important.

Néanmoins, quelle que soit la technique de recherche de trajets, il faut souligner que la modélisation du canal reste incomplète. En effet, ces techniques tiennent compte du phénomène de multi-trajets entre des émetteurs et des récepteurs qui peuvent être mobiles mais dans des environnements constitués d'éléments fixes. Cela peut conduire à négliger certaines variations temporelles du canal (cf. *Chapitre 1.2.1.1*).

Finalement, les modèles asymptotiques offrent une description précise du canal radio reçu en tenant compte des multi-trajets et en caractérisant simultanément les différentes propriétés de l'onde (l'atténuation, le retard et la phase, la polarisation, etc.). Néanmoins, leur temps de calcul devient rapidement important si la configuration de l'environnement est complexe, ce qui peut être le cas pour les VANETs.

Un exemple : le simulateur de tracé de rayons CRT

Communication Ray Tracer (CRT) est un simulateur de propagation déterministe développé par le laboratoire XLIM-SIC UMR CNRS n°7252 de l'Université de Poitiers [5]. Il permet de modéliser la propagation d'une onde électromagnétique dans un environnement modélisé en 3D. CRT se base sur une technique de tracé de rayons 3D pour la recherche des trajets entre deux points (émetteur et récepteur) dans un milieu de transmission. Ainsi, pour une liaison émetteur-récepteur choisie, il peut déterminer l'ensemble des trajets existants en termes de retard, d'atténuation, de phase et de polarisation en fonction de l'environnement. Il permet de caractériser complètement le canal en bandes étroite et large et ainsi, d'obtenir une approche réaliste du multi-trajets.

La *figure 2.3* montre un exemple d'une simulation CRT de propagation multi-trajets dans un environnement urbain en 3D. Chaque ligne blanche représente un trajet parcouru par une onde entre l'émetteur et le récepteur. Ici, l'émetteur est représenté par un cercle blanc et le récepteur par un cercle noir. La procédure de simulation de CRT se décompose en deux étapes. Premièrement, l'utilisateur définit un environnement et place un émetteur et un récepteur communicant dans cet environnement. Deuxièmement, CRT calcule la réponse impulsionnelle pour ce lien.

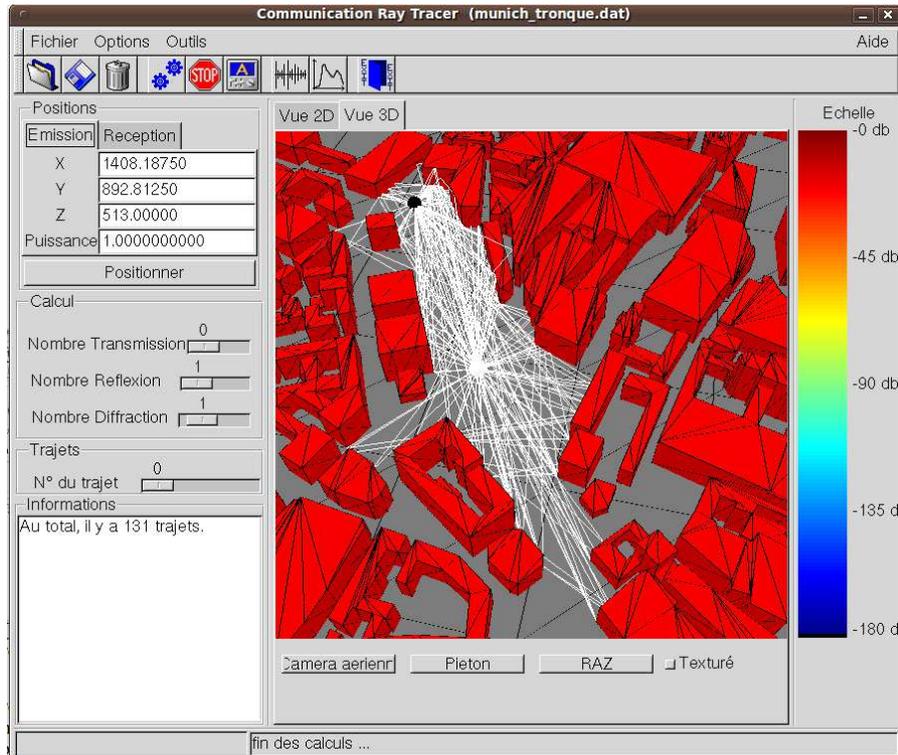


Figure 2.3 : Une simulation de propagation multi-trajets avec CRT dans un environnement urbain 3D.

Il convient de noter que CRT permet de traiter des configurations SISO (Simple Input Simple Output) aussi bien que MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Les réponses impulsionnelles (RI) issues des simulations correspondent au fichier de sortie du simulateur (format binaire). Elles sont structurées selon un formalisme simple qui donne toutes les informations relatives à chaque trajet radio. Ces réponses impulsionnelles peuvent ainsi être utilisées, traitées ou analysées très facilement par la suite. Un exemple de réponses impulsionnelles est montré sur la *figure 2.4*.

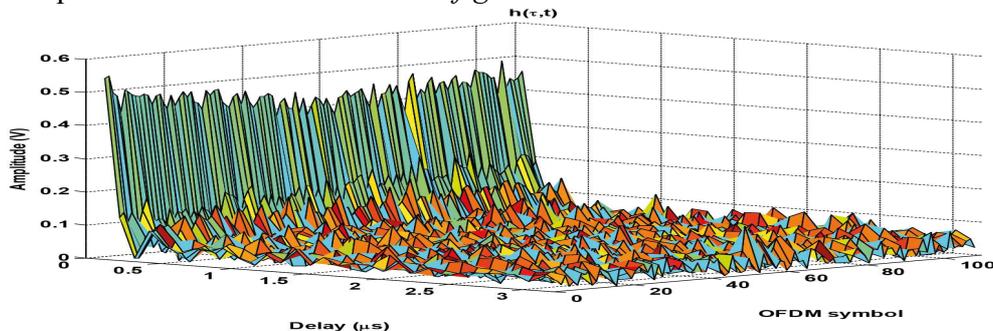


Figure 2.4 : Un exemple de réponses impulsionnelles en milieu urbain.

La *figure 2.4* montre un exemple de réponses impulsionnelles en milieu urbain avec une distance émetteur-récepteur de 800m maximum. On a l'étalement des retards en axe des x, et la puissance en axe des y.

Afin d'illustrer l'impact du modèle de propagation retenu pour un calcul de zone de couverture, la figure suivante présente une cartographie de puissance reçue calculée par le modèle en espace libre (*figure 2.5a*) et le simulateur déterministe CRT (*figure 2.5b*).

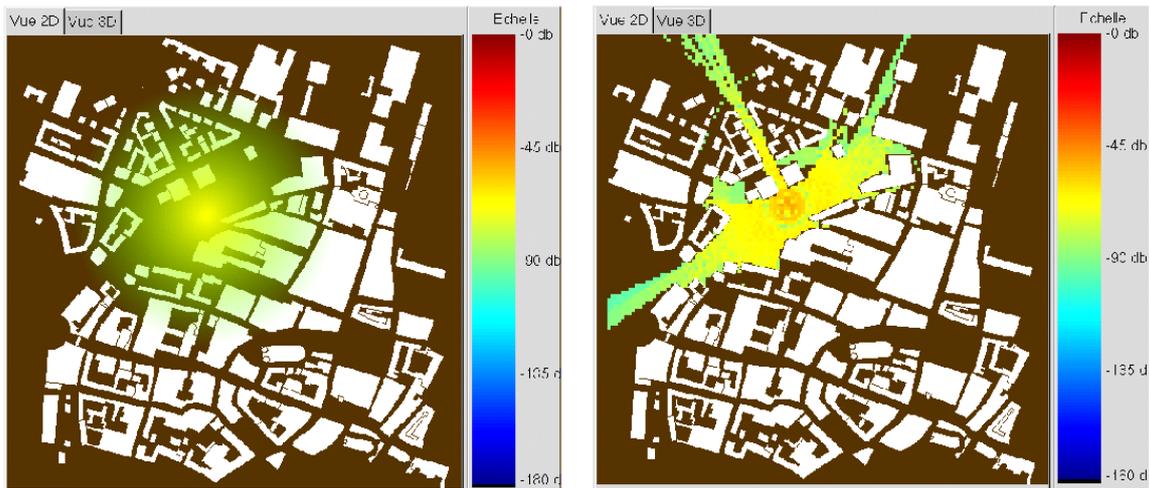


Figure 2.5a : Propagation du modèle Free Space. Figure 2.5b : Propagation du modèle à tracé de rayons.

On peut constater que la propagation de la puissance pour le modèle en espace libre est uniformément répartie dans toutes les directions autour du terminal, alors que pour le modèle déterministe, l'atténuation est fortement perturbée et dépend principalement de la position des obstacles dans l'environnement entre l'émetteur et le récepteur.

2.1.3 Modèles statistiques

Les modèles statistiques [18] prédisent un comportement global du canal de propagation. Leur principe repose sur l'association d'une loi statistique à un ensemble d'environnements ou de configurations qui partagent les mêmes spécificités. Ils sont localement moins précis que les modèles de propagation déterministes mais globalement corrects. Ils présentent l'avantage d'être simples et rapides, ce qui permet un calcul très rapide de la puissance reçue.

On distingue deux familles de modèles statistiques : les modèles à distributions statistiques et les modèles géométriques. Les modèles à distributions statistiques les plus couramment utilisés dans le domaine des télécommunications sans fil sont : Rayleigh, Rice, Log normale et Nakagami. Les modèles géométriques déterminent des trajets grâce à une approche simplifiée de tracé de rayons permettant de calculer une réponse impulsionnelle à partir d'éléments dispersifs placés dans la scène.

Ce paragraphe présente des exemples des deux familles de modèles statistiques.

2.1.3.1 Modèles à distributions statistiques

Distribution statistique de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est utilisée pour modéliser les variations rapides de l'amplitude du signal reçu (z) en considérant la densité de probabilité de Rayleigh [18] définie par l'équation 2.2 :

$$P_Z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.2)$$

avec $2\sigma^2$ la puissance moyenne efficace du signal reçu.

On utilise généralement cette distribution dans le cas d'un environnement de propagation riche en multi-trajets, mais dans lequel aucun des trajets ne prédomine en terme de puissance. La phase de chaque trajet est supposée uniformément répartie sur l'intervalle $[-\pi, \pi]$.

Distribution statistique de Rice

La distribution de Rice est utilisée pour modéliser la propagation dans un environnement avec un trajet prédominant en terme de puissance. Dans ce cas, l'amplitude du signal reçu (z) est décrite par la densité de probabilité de Rice [18] :

$$P_Z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{z.A}{\sigma^2}\right) \quad (2.3)$$

avec $I_0(x)$ la fonction de Bessel (1^{ère} espèce d'ordre 0) et A l'amplitude du trajet prédominant.

Cette modélisation du canal est paramétrée selon le facteur de Rice K , qui exprime le rapport entre la puissance du trajet prédominant et les puissances des multi-trajets. Le facteur de Rice représente le degré d'évanouissement. Mathématiquement, on a $K = A^2 / 2\sigma^2$. On constate que lorsque $K = 0$, on retrouve la densité de probabilité de Rayleigh, et que lorsque $K \rightarrow \infty$, on retrouve une distribution Gaussienne.

Distribution statistique Log-normal

Le modèle log-normal se distingue des deux autres modèles présentés parce qu'il inclut la moyenne du signal pour modéliser les variations du canal sur une plus grande échelle [18]. La densité de probabilité du modèle log-normal s'exprime par :

$$P_Z(z) = \frac{1}{z\sigma_n\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln.z - \mu)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (2.4)$$

avec μ la moyenne de la loi log-normale en dB et σ_n^2 sa variance.

La moyenne μ correspond à l'atténuation moyenne du signal reçu et elle peut être calculée par des modèles d'atténuation à grande échelle. La variance σ_n^2 est généralement fixée de façon empirique selon le type d'environnement à modéliser [18].

Distribution statistique de Nakagami

La distribution de Nakagami est paramétrable suivant l'environnement de propagation, c'est-à-dire suivant les conditions de transmission [18]. L'amplitude du signal reçu (z) est décrite par la densité de probabilité de Nakagami :

$$P_Z(z) = \frac{2m^m z^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mz^2}{\Omega}\right), m > 0,5 \quad (2.5)$$

avec $\Omega = E[z^2]$ la puissance moyenne reçue, Γ la fonction Gamma et m le degré d'évanouissement. Selon la valeur de m , il est alors possible d'approcher d'autres lois statistiques. Pour $m = 1$, la distribution de Nakagami est réduite à une distribution de Rayleigh, alors que pour $2m = 0,5$, elle approche la partie positive de la loi Log-normale. Enfin pour $m = (K+1)^2 / (2K+1)$, elle approche le modèle de Rice [18].

Il existe plusieurs jeux de paramètres de Nakagami qui permettent de définir un environnement ou un autre. Par exemple, l'un des plus utilisés est le jeu de paramètre Highway101, qui représente le canal de propagation sur l'autoroute 101.

2.1.3.2 Modèles géométriques

L'approche géométrique utilise l'interprétation physique des phénomènes de propagation. On trouve plusieurs modèles géométriques dans la littérature, notamment les modèles à anneaux et les modèles électromagnétiques. Cette partie présente ces modèles.

Modèles à un et deux anneaux

Les modèles à un ou deux anneaux [18] placent les éléments dispersifs autour du mobile et de la station de base sur des anneaux. Ces anneaux sont centrés sur le récepteur dans le cas du modèle à un anneau, et sur l'émetteur et le récepteur dans le cas du modèle à deux anneaux. Il existe plusieurs distributions des diffuseurs possibles sur les anneaux (uniforme, gaussienne, etc.). Un exemple de modèle à un anneau est illustré sur la *figure 2.6* :

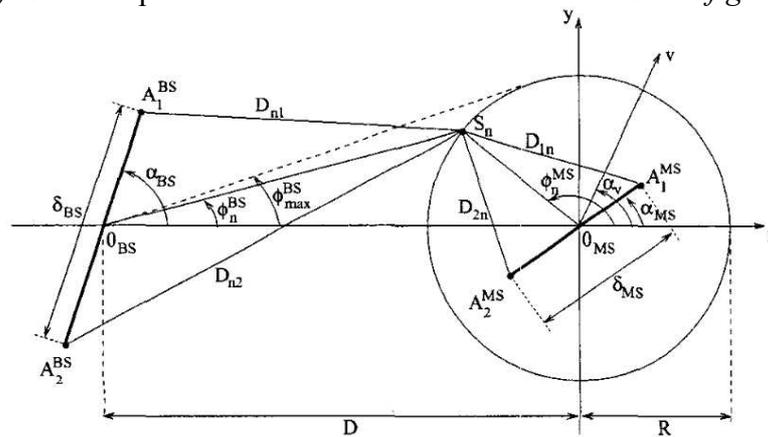


Figure 2.6 : Un exemple de modèle à un anneau avec ses paramètres, pour un canal MIMO 2x2.

La *figure 2.6* montre l'ensemble des paramètres, en distances et en angles, nécessaires au modèle à un anneau, pour un canal MIMO 2x2. Sn représente les diffuseurs autour de la station mobile MS (Mobile Station) par rapport à la station de base BS (Base Station). On constate que le modèle à un anneau est adapté pour les communications cellulaires. En revanche, ces modèles souffrent de plusieurs contraintes comme le fait qu'il n'y a pas de trajet direct possible entre l'émetteur et le récepteur par exemple. Mais le plus gros inconvénient au regard du contexte des VANETS, est que ces modèles ne tiennent pas compte de la mobilité.

Modèles électromagnétiques

Les modèles électromagnétiques [18] tentent de pallier les défauts des modèles à anneaux. Les phénomènes de réflexion, de polarisation et surtout de mobilité sont pris en compte. Dans le cas de ces modèles, les diffuseurs sont cette fois distribués uniformément autour du mobile (en trois dimensions). Les diffuseurs sont également répartis dans des groupes appelés *clusters*. L'un des diffuseurs représente le cluster.

Finalement, les champs émis depuis l'émetteur, réfléchis par les diffuseurs et reçus par les récepteurs, sont calculés grâce à la théorie des ondes électromagnétiques. Point très important pour le contexte VANET, ces modèles considèrent l'effet Doppler. Cependant, ces modèles présentent des inconvénients car ils nécessitent une description précise des diffuseurs, et ne sont valables que dans des environnements pour lesquels ils ont été vérifiés. En dehors de ces contraintes, leurs caractéristiques permettent de s'adapter au contexte des réseaux VANETS.

Un exemple : le simulateur SCME-UM

Le modèle de canal statistique Spatial Channel Model Extended (SCME) est une évolution du modèle Spatial Channel Model (SCM) de 3GPP [19]. Il a été développé dans le cadre du projet Européen WINNER [20] pour la simulation de systèmes B3G (Beyond 3G). Le modèle SCM est limité à la simulation de systèmes de fréquence 2 GHz pour une largeur de bande de transmission de 5 MHz maximum. SCME permet quant à lui de simuler des systèmes de fréquences 2 et 5 GHz et ceci jusqu'à une largeur de bande de transmission de 100 MHz [21].

SCM et SCME sont des modèles dits géométriques dans lesquels les éléments dispersifs de la scène sont placés de manière stochastique. Le modèle SCME considère N clusters d'éléments dispersifs. Chaque cluster correspond à un trajet résolvable. A l'intérieur de chaque trajet, il y a M sous-trajets non résolubles. Un graphe simplifié du modèle est représenté sur la *figure 2.7*.

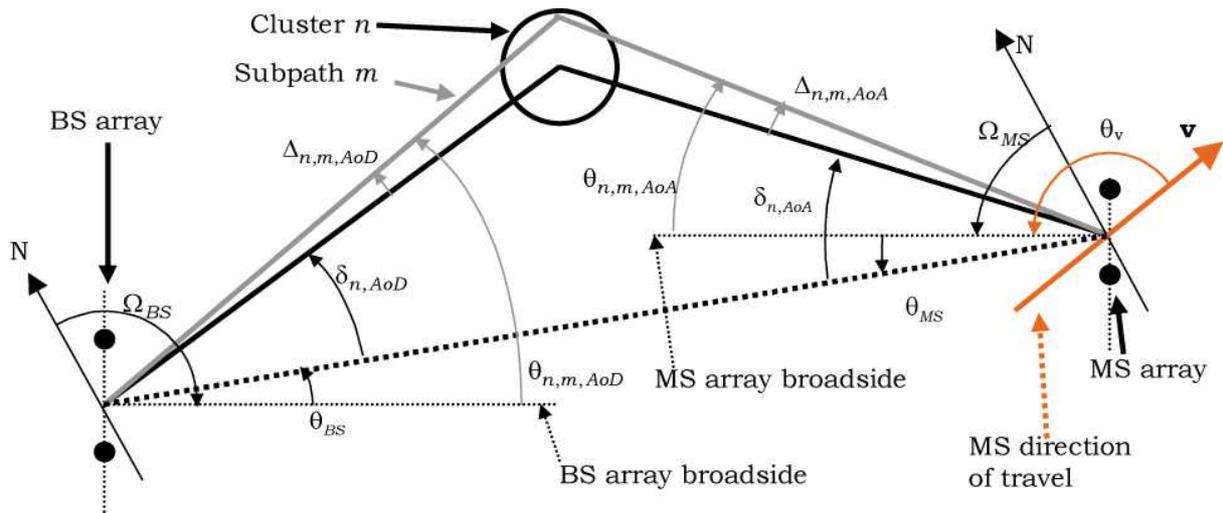


Figure 2.7 : Paramètres géométriques du modèle SCME.

Cette figure montre les principaux paramètres géométriques utilisés par le modèle lorsqu'une station de base (Base Station : BS) communique avec une station mobile (Mobile Station : MS). Précisons que la station de base est située à une hauteur de 10 mètres, et que la ou les stations mobiles sont situées à une hauteur de 1,5 mètres. Dans cet exemple, on ne montre qu'un cluster identifié «n». Un sous-trajet est également explicité, identifié «m».

SCME est un modèle nativement MIMO. La configuration SISO du modèle n'est qu'un cas particulier de la configuration MIMO. Ainsi, pour un réseau d'antennes de station de base (BS) composé de NT éléments et un réseau d'antennes mobiles (MS) de NR éléments, les caractéristiques en amplitude et phase des N composants multi-trajets sont données par une matrice de dimension NT x NR d'amplitudes complexes obtenues par la méthode de la somme de sinusoides [22]. Les détails de la génération des paramètres clés du modèle sont donnés dans la référence [4].

La réponse impulsionnelle du modèle SCME est donnée par l'équation 2.6.

$$h_{u,s,n}(t) = \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M \left(\begin{array}{l} \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})} \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m}]) \times \\ \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})) \times \\ \exp(jk\|\mathbf{v}\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)) \end{array} \right) \quad (2.6)$$

L'équation 2.6 correspond à la réponse impulsionnelle du canal pour le n^{ième} composant multi-trajets entre la s^{ième} antenne d'émission et la u^{ième} antenne de réception pour des réseaux d'antennes omnidirectionnelles en émission et en réception, et en négligeant l'atténuation en espace libre et les effets de masque.

Les termes de cette relation sont :

- k le nombre d'onde $2\pi/\lambda$,
- λ la longueur d'onde de la porteuse en mètre,
- P_n la puissance du n^{ième} composant multi-trajets,

- M le nombre de sous-trajets par trajet,
- d_s la distance en mètre entre l'élément s de la BS par rapport à l'antenne de référence,
- d_u la distance en mètre entre l'élément u du MS par rapport à l'antenne de référence,
- v le module du vecteur vitesse du MS,
- $\theta_{n,m,AoA}$ l'angle d'arrivée (AOA) du $m^{i\text{ème}}$ sous-trajet du $n^{i\text{ème}}$ trajet déterminé par rapport à la ligne transversale du MS,
- $\theta_{n,m,AoD}$ l'angle de départ (AOD) du $m^{i\text{ème}}$ sous-trajet du $n^{i\text{ème}}$ trajet déterminé par rapport à la ligne transversale de la BS.

Le fonctionnement du modèle en mode SISO est identique avec les uniques antennes émettrices et réceptrices correspondant aux antennes de référence. La station de base reste située à une hauteur de 10 mètres, et la ou les stations mobiles sont situées à une hauteur de 1,5 mètres. Enfin, la présence ou non d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur est déterminante pour la propagation des ondes.

SCME permet de simuler trois types d'environnements :

- Urban Macrocell (macrocellule urbaine avec une distance entre mobile et station de base de 3 km maximum),
- Suburban Macrocell (macrocellule suburbaine avec une distance entre mobile et station de base de 3 km maximum),
- Urban Microcell (microcellule urbaine avec une distance entre mobile et station de base de 1 km maximum).

Dans le contexte urbain des VANETs, du fait des distances inter-véhicules généralement inférieures au kilomètre, l'environnement Urban Microcell (UM) semble être le plus adapté.

2.1.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les familles de modèles de propagation et décrit deux exemples particuliers de modèles : un modèle géométrique statistique, SCME, et un simulateur purement déterministe CRT. Nous avons vu que chacun de ces outils présente des caractéristiques intéressantes pour la simulation de réseaux VANETs. Mais ils présentent aussi des inconvénients majeurs. Le modèle SCME se décline en plusieurs sous-modèles dépendants de l'environnement et ne pouvant s'adapter automatiquement durant la simulation. Le simulateur CRT est, quant à lui, basé sur la technique de tracé de rayons qui est très coûteuse en temps de calcul, particulièrement dans un contexte où l'ensemble des émetteurs et récepteurs est en perpétuel mouvement. Ainsi, ces propositions ne sont pas satisfaisantes individuellement pour des raisons de réalisme ou de temps de calcul. Notre objectif est donc de proposer un nouveau modèle adapté aux VANETs.

2.2 Un modèle de couche physique semi-déterministe

La présentation des approches de modélisation, considérée dans CRT et SCME dans la section précédente, met en avant quelques principes clés.

Le modèle statistique SCME est très efficace pour produire des réponses impulsionnelles correspondant à un environnement modélisé par plusieurs clusters placés aléatoirement dans une scène. Cependant, il ne tient pas compte des spécificités géométriques et des propriétés électriques des matériaux d'un environnement particulier.

Le simulateur CRT basé sur un tracé de rayons 3D est capable de fournir des réponses impulsionnelles directement liées à l'environnement de propagation, grâce à une modélisation complète de chaque interaction entre les ondes radioélectriques et l'environnement. En contrepartie, CRT nécessite un temps de calcul très important pour le calcul de chaque réponse impulsionnelle. Aussi, pour des applications VANETs qui introduisent de la mobilité pour les nœuds, et un grand nombre de liens radioélectriques possibles entre les nœuds dans le réseau, cette solution engendre un temps de calcul important, voire prohibitif.

Pour résoudre ce problème, nous proposons une méthode d'hybridation des deux modèles présentés précédemment, le modèle résultant sera appelé UM-CRT. Notre contribution consiste à combiner l'approche déterministe pour isoler les phénomènes majeurs de la propagation des ondes avec l'approche statistique pour bénéficier d'un temps de calcul raisonnable. Ainsi, notre modèle semi-déterministe a pour objectif d'associer la prise en compte de l'environnement de propagation déterministe au modèle statistique géométrique, permettant de simuler de manière fiable et rapide le comportement de canaux SISO et MIMO dans le domaine des VANETs.

Sur cette base, nous développons deux modélisations de couche physique semi-déterministe, l'une SISO et l'autre MIMO. En SISO, la modélisation repose sur le modèle de propagation proposé UM-CRT associé à une chaîne de transmission correspondant à la norme IEEE 802.11p. En MIMO, UM-CRT est associé à la norme IEEE. 802.11n.

Ce paragraphe se décompose de la manière suivante. Tout d'abord, le principe et les méthodes du modèle de propagation semi-déterministe vont être explicités. Ensuite, l'implémentation de la partie 802.11p sera détaillée. En effet, des travaux précédents [10] avaient consisté à implémenter la norme 802.11.n. L'intégration des couches physiques dans le simulateur NS-2 est présentée. Enfin, une évaluation et une analyse de la couche physique développée viendront conclure cette partie.

2.2.1 Le modèle de propagation semi-déterministe UM-CRT

Le principe global du modèle proposé consiste à considérer le modèle SCME comme le coeur de notre proposition, compte-tenu de sa rapidité de temps de calcul, que le modèle déterministe CRT vient paramétrer dynamiquement selon les spécificités de l'environnement rencontrées par les ondes entre deux noeuds communicants mobiles.

L'élément majeur dans la propagation des ondes est la présence ou pas d'obstacles entre un émetteur et un récepteur. Nous avons donc choisi de nous focaliser sur la détermination de la présence possible des trajets en visibilité appelés LOS (Line Of Sight) et sur leur prise en compte dans UM-CRT.

Ainsi, nous faisons différentes hypothèses. La première hypothèse est que le critère déterminant à paramétrer pour le modèle SCME-UM est le trajet direct ou non de l'onde électromagnétique. La deuxième hypothèse est que le modèle SCME-UM, prévu pour la téléphonie, est compatible pour des transmissions VANETs. En effet, le modèle SCME-UM est prévu avec une station de base à une hauteur de 10 m et des récepteurs faiblement mobiles à une hauteur de 1 m, alors que les VANETs que nous voulons étudier, se composent d'émetteurs et récepteurs fortement mobiles avec une hauteur d'antenne de 3 m maximum. Troisième hypothèse : les vitesses moyennes fixes utilisées pour calculer les RI, en fonction des différents scénarios de mobilité, sont équivalentes aux vitesses variables. En effet, les RI générées par SCME-UM sont calculées à vitesse fixe, alors que les noeuds des simulations VANETs ont des vitesses variables. La partie consacrée à l'évaluation du modèle viendra confirmer ou non ces hypothèses.

Notre proposition consiste ainsi à limiter la recherche des trajets par tracé de rayons au trajet direct. Ceci présente deux avantages :

- Elle prend en compte les caractéristiques géométriques de l'environnement considéré en déterminant l'éventuelle présence des trajets LOS .
- Elle réduit considérablement le temps de calcul de la simulation déterministe.

UM-CRT a ainsi été créé grâce à l'association des deux approches, l'une déterministe et l'autre statistique. La *figure 2.8* montre les relations entre UM-CRT et à la fois CRT et SCME-UM, respectivement représentées par des flèches fines en vert et en bleu. Le modèle UM-CRT est représenté par des flèches larges hachées en rouge.

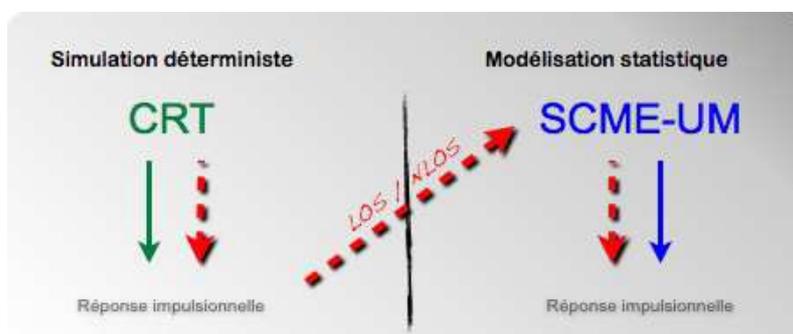


Figure 2.8 : Principe du modèle UM-CRT.

Les réponses impulsionnelles du modèle proposé UM-CRT sont ainsi calculées de manière statistique par le modèle SCME-UM selon un paramétrage déterministe d'existence ou pas du trajet direct. Cette détermination du trajet LOS est obtenue par le simulateur déterministe CRT.

Les auteurs de la référence [21] mettent à disposition de la communauté une implémentation Matlab du modèle SCME [24] que nous avons utilisée dans nos simulations. Grâce à elle, nous avons pu générer des réponses impulsionnelles qui ont été utilisées par la suite dans la chaîne de communication numérique. Le code étant très permissif, les réponses impulsionnelles issues de SCME-UM ont été sauvegardées au même format que celles du simulateur CRT.

Pour réduire encore le temps de calcul des simulations déterministes, nous proposons de considérer les propriétés de stationnarité du canal déjà introduites dans CRT et montré dans [10]. Nous considérons ainsi que la réponse impulsionnelle du canal est constante dans un rayon de 8 mètres par rapport à la position de référence. Ainsi, nous ne calculons pas la réponse impulsionnelle pour chaque position mais uniquement pour un nombre fini de distances entre émetteur et récepteur. En pratique, comme le modèle SCME-UM est limité à une distance de 600 mètres maximum (voir paragraphe 2.1.3.2) entre l'émetteur et le récepteur, nous avons arbitrairement choisi d'utiliser un jeu de 90 distances possibles pour calculer les réponses impulsionnelles. Cela permet de pré-calculer les réponses impulsionnelles pour accélérer encore le temps de calcul des simulations VANETs, tout en gardant un pas de distances suffisamment précis.

Il est à noter que la simulation complète de CRT avec les multi-trajets est toujours possible afin de pouvoir extraire d'une réponse impulsionnelle complète des informations telles que l'étalement des retards, par exemple. Cependant, c'est une opération très coûteuse en temps de calcul. De plus, dans ce cas, la prise en compte des zones de stationnarité ne se fait pas de la même manière. En effet, CRT calcule une RI pour chaque position d'émetteur/récepteur, et une zone de stationnarité est définie autour de ces positions. Dans le cas UM-CRT, on détermine le cas LOS ou NLOS à partir de CRT, puis on calcule une RI qui inclut une zone de stationnarité, mais avec SCME-UM cette fois. La zone de stationnarité n'existe donc pas au niveau de CRT mais au niveau de SCME-UM avec le modèle UM-CRT. Enfin, dans le cas du modèle UM-CRT complet, la zone de stationnarité est prise en compte dans CRT et dans SCME-UM. Ainsi, la zone de stationnarité au niveau des RI de CRT existe pour les modèles CRT et UM-CRT complet, mais pas dans le modèle UM-CRT.

Pour résumer, avec un scénario VANET donné, le modèle UM-CRT permet de calculer statistiquement les réponses impulsionnelles de chaque lien radioélectrique entre deux nœuds mobiles, à chaque instant, en fonction de la distance émetteur-récepteur et du cas de figure LOS/NLOS déterminé de manière déterministe.

2.2.2 Une couche physique semi-déterministe

Différents travaux successifs sur NS-2 réalisés à XLIM-SIC, dont notamment [10], ont permis d'implémenter complètement les deux couches physiques SISO et MIMO conformément aux normes 802.11a et 802.11n. Ces implémentations ont été réalisées avec le langage C++ et la bibliothèque de traitement du signal *itpp* [25]. Dans ces travaux, le simulateur CRT permet l'obtention des réponses impulsionnelles du canal qui sont ensuite utilisées pour modéliser le canal dans la chaîne de transmission concernée. Le cas de la chaîne 802.11a [26] est détaillé en *figure 2.9*.

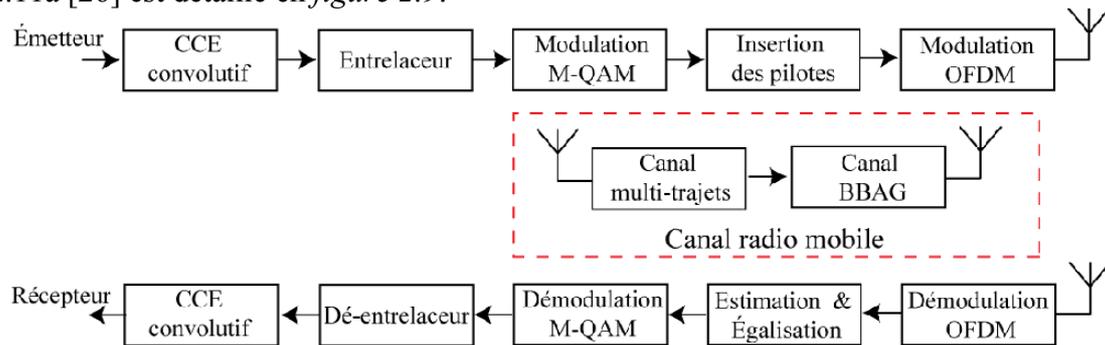


Figure 2.9 : Chaîne de transmission 802.11a [9].

La *figure 2.9* montre toutes les étapes de la chaîne de transmission 802.11a, avec la possibilité de calculer en bout de chaîne un Taux d'Erreurs Binaires (TEB) en comparant les deux informations binaires, émise et reçue.

Cette couche physique ainsi créée prend comme entrées : la modélisation de l'environnement de transmission, les positions des émetteurs et récepteurs à tout instant, le débit de transmission, Elles donnent en sorties la puissance reçue et le TEB correspondant à chaque lien. Ces informations caractérisant la qualité du lien d'un couple émetteur-récepteur sont sauvegardées dans des fichiers spécifiques appelés *cache des RI* et *cache des TEB*. L'intérêt de ces fichiers est d'éviter de recalculer des RI ou TEB déjà existants, et ainsi de gagner du temps. Comme nous avons limité le nombre de calcul à 90 distances possibles (*cf. partie 2.2.1*), une fois l'ensemble des calculs effectués, il suffit de lire les fichiers pour obtenir un résultat et il n'y a plus besoin de lancer de calculs supplémentaires.

Notons que deux blocs de la *figure 2.9* n'ont pas encore été explicités jusqu'à présent dans la thèse : le bloc entrelaceur et le bloc égalisation. L'entrelaceur permet de répartir les erreurs sur plusieurs paquets et permet aux codes correcteurs de contrer les longues suites de bits ou d'octets erronées. Les techniques d'égalisation permettent, quant à elles, de lutter contre la sélectivité fréquentielle du canal multi-trajets.

Les travaux de [10] contribuent à modéliser à la fois la propagation des ondes dans l'environnement et les pertes de paquets induites par un canal radio mobile. Les modèles d'erreurs de la couche physique ainsi formés sont calculés conformément aux normes 802.11a et 802.11n des cas SISO et MIMO respectifs. Les coefficients du canal associés à chaque lien sont obtenus à partir de la réponse impulsionnelle complexe provenant du modèle de propagation CRT. La contribution présentée dans la suite de ce chapitre est de proposer une couche physique constituée du modèle semi-déterministe UM-CRT avec les standards 802.11p ou 802.11n.

Le modèle SCME contient tous les éléments nécessaires paramétrables pour intégrer une couche physique selon les normes 802.11p et 802.11n. C'est donc au niveau du code de SCME que le 802.11p est intégré dans UM-CRT, et c'est au niveau des RI générées par SCME que nous allons retrouver son impact sur la transmission. Ensuite, l'intégration du 802.11p dans les couches supérieures (comme la couche MAC par exemple) se situe au niveau des paramètres de simulation standard du simulateur NS-2, dans les scripts *Tcl*.

Le calcul des TEB de notre couche physique semi-déterministe a pour objectif de réduire le temps de calcul par rapport à une couche physique déterministe. Ce qui prend du temps dans le cas déterministe, c'est le fait de devoir calculer un TEB pour chacune des positions émetteur-récepteur de la simulation. En effet, dans un scénario VANETs, il y a un très grand nombre de positions possibles pour chaque nœud. Par contre, le nombre de distances possibles entre ces mêmes nœuds est beaucoup plus faible. A partir de ce constat, nous avons utilisé la réponse impulsionnelle statistique donnée par SCME-UM pour calculer un TEB pour chaque distance émetteur-récepteur, et non pas chaque position, lors d'une phase de pré-traitement. Ainsi, le nombre de TEB à calculer est limité.

Plus précisément, le TEB se calculant grâce à la RI du canal et à la chaîne de transmission utilisée, on détermine donc un TEB pour chacune des RI du canal. Avec le simulateur CRT, il y a une RI pour chaque position d'émetteur et de récepteur dans l'environnement, soit une quantité énorme de RI à calculer et donc une quantité énorme de TEB à calculer. Avec le modèle SCME-UM, il y a une RI pour chaque distance émetteur-récepteur dans le cas LOS et dans le cas NLOS, soit deux fois le nombre total de distances. On explique dans la *partie 2.2.1* qu'on utilisera 90 distances pour chaque cas, soit 180 RI à calculer en tout, soit 180 TEB à calculer en tout. Cette limitation du nombre de calcul à effectuer apporte un gain de temps évident et considérable.

L'ensemble constitué par le modèle de propagation UM-CRT et la chaîne de transmission 802.11 p ou 802.11.n constitue donc une couche physique réaliste et efficace.

2.2.3 Évaluation de la couche physique semi-déterministe

Dans cette section, nous évaluons les performances de la couche semi-déterministe proposée en termes de précision et de temps de calcul. Pour évaluer la fiabilité de notre méthode de calcul de TEB, nous avons considéré le standard 802.11p pour un environnement dans lequel nous avons effectué des simulations avec les modèles CRT et UM-CRT.

Nous avons effectué des simulations de scénario VANET avec 60 nœuds mobiles se déplaçant dans le centre-ville de Munich, illustré en *figure 2.10*. Les bâtiments sont représentés en rouge, et l'ensemble des 60 véhicules se déplacent dans cet environnement. Les simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions de mobilité pour chacune des couches physiques considérées.



Figure 2.10 : Environnement de simulation, le centre ville de Munich.

La figure 2.11 montre l'évolution du TEB de la couche physique basée sur CRT en fonction du SNR (Signal to Noise Radio) observée pour tous les liens associés aux scénarios simulés.

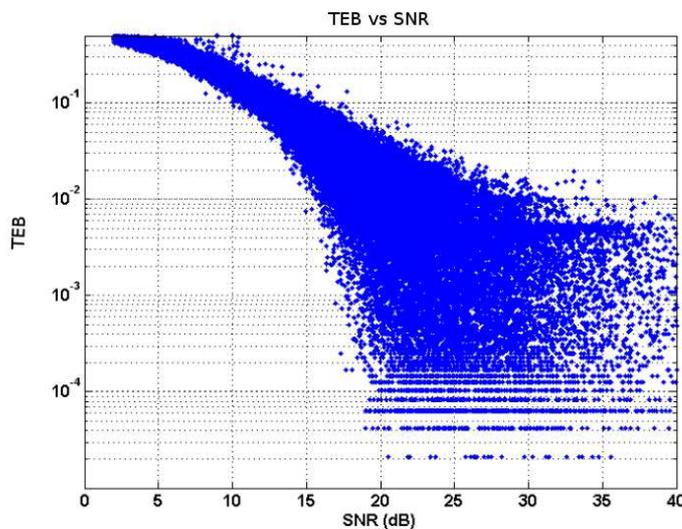


Figure 2.11 : Évolution du TEB en fonction du SNR avec CRT.

On voit sur la figure 2.11 la répartition des TEB en fonction des SNR (Signal to Noise Radio) avec CRT. La grande quantité de TEB calculés forme un nuage de points. On constate un TEB moyen d'environ $0,9 \times 10^{-1}$ pour un SNR de 10 dB et un TEB moyen d'environ 5×10^{-2} pour un SNR de 20 dB, mais avec une forte dispersion avoisinant un facteur 100 dans le deuxième cas.

La figure 2.12 montre quant à elle l'évolution du TEB de la couche physique basée sur UM-CRT en fonction du SNR observé dans les mêmes conditions.

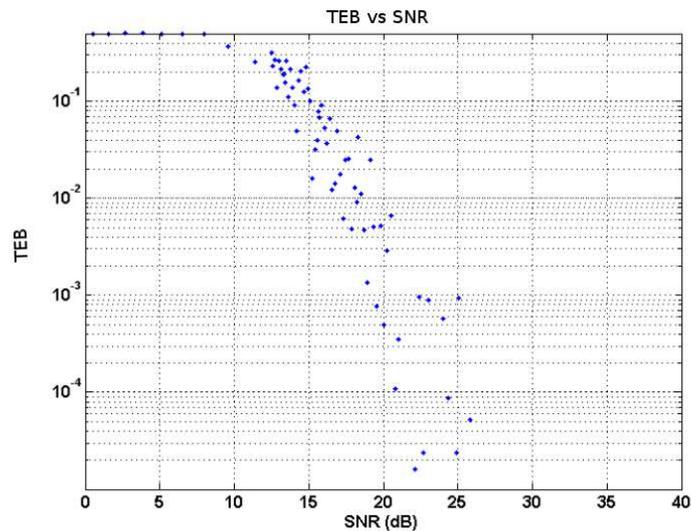


Figure 2.12 : Évolution du TEB en fonction du SNR avec UM-CRT.

Tout d'abord, cette figure montre que le nombre de TEB calculés est ici très nettement plus limité par rapport à la couche physique déterministe basée sur CRT. Cela est tout à fait normal compte tenu du principe de réduction du nombre de calculs, exposé dans la section précédente dans l'objectif de réduction du temps de simulation. Étant donné que le simulateur CRT calcule une RI par position émetteur-récepteur, et donc autant de TEB et SNR que de RI, on retrouve alors autant de points sur la *figure 2.11* que de positions émetteur-récepteur. En revanche, avec la couche physique basée sur UM-CRT, il n'y a que 90 RI possibles (pour les cas LOS/NLOS) et donc uniquement 180 points que la *figure 2.12* illustre (cf *Chapitre 2.2.1*). Même si on ajoute des nœuds ou si la mobilité augmente, un TEB sera associé à chaque distance en fonction du critère LOS et NLOS, c'est-à-dire 180 possibilités et pas plus.

Au delà de la densité du nuage de points de ces figures, on retrouve globalement les mêmes résultats, à savoir un TEB moyen environ égal à $0,8 \times 10^{-1}$ pour un SNR de 10 dB et un TEB moyen environ égal à 5×10^{-2} pour un SNR de 20 dB.

Pour faciliter la comparaison des résultats entre les deux modes de calcul, la *figure 2.13* montre l'évolution des TEBs moyens en fonction du SNR pour tous les liens radio, avec en rouge les résultats de UM-CRT et en bleu les résultats de CRT.

Il ressort que les deux courbes sont très voisines sauf pour les forts SNR supérieurs à 20 dB, compte tenu du faible nombre de TEB calculés par UM-CRT. Cela constitue une validation des résultats semi-déterministes proposés par rapport aux résultats de référence obtenus par une approche déterministe au moins jusqu'à un SNR de 20 dB. Soulignons qu'au delà de 20 dB, de toute façon, la qualité de transmission est très bonne. Aussi, une évaluation optimiste de UM-CRT par rapport à CRT ne présente pas de difficulté majeure en terme d'applications VANETS.

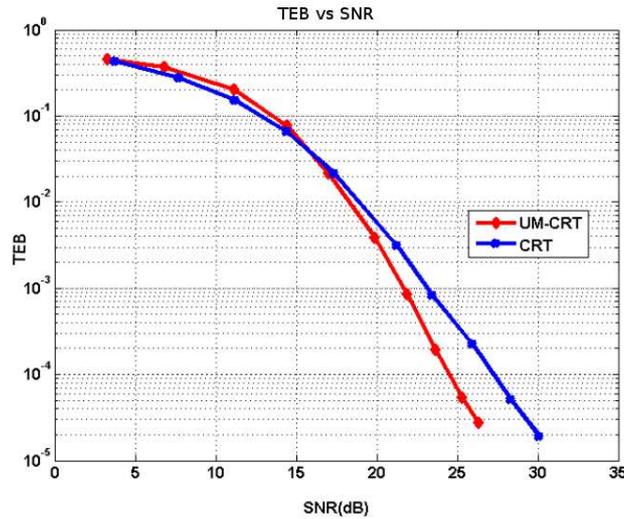


Figure 2.13 : Évolution du BER en fonction du SNR obtenu avec CRT et UM-CRT.

Après l'évaluation des performances de la couche physique semi-déterministe en terme de précision, nous allons maintenant nous intéresser à l'évaluation du gain qu'elle offre en temps de calcul.

Le *tableau 2.1* présente les temps de simulation, arrondis en h, nécessaires pour 4 scénarios donnés en fonction du modèle de propagation utilisé dans la couche physique du simulateur NS-2. Ces scénarios ont été sélectionnés aléatoirement parmi l'ensemble des simulations pour valider ou non les performances de notre modèle UM-CRT. Ces simulations ont été réalisées sur une machine quadricoeur Intel(R) Core(TM) i5 CPU 750 @ 2.67 GHz avec un OS LINUX Ubuntu Version 10.04 (lucid).

Scenario	CRT				UM-CRT				SCME-UM			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pre-processing Full CRT (h)	18	18	17	18								
Pre-processing LOS/NLOS (h)					1	1	1	1	1	1	1	1
Simulation (h)	57	65	55	63	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
TOTAL Time (h)	75	83	72	81	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Tableau 2.1: Comparaison des temps de simulation (en h).

La première ligne du *tableau 2.1* (*Pre-processing Full CRT*) donne l'indication du temps de calcul pour obtenir la RI complète du canal avec CRT. La deuxième ligne du tableau (*Pre-processing LOS/NLOS*) donne l'indication du temps de calcul pour obtenir la RI avec les modèles qui tiennent compte du critère LOS ou NLOS. La ligne suivante (*simulation (h)*) correspond au temps de simulation, et cela inclut le calcul des TEB. Finalement, la dernière ligne est un résumé du temps nécessaire pour une simulation selon chaque modèle.

Plusieurs remarques peuvent être faites concernant les temps de calcul des RI :

- Le modèle CRT ne fonctionne pas sans un calcul complet des réponses impulsionnelles.
- Le modèle UM-CRT peut fonctionner avec un calcul complet des réponses impulsionnelles. Dans ce cas, la phase de pré-traitement sera la même que dans le cas CRT.
- Le modèle SCME-UM ne dispose d'aucun moyen de déterminer l'environnement. Il ne peut donc pas calculer les réponses impulsionnelles complètes en fonction de l'environnement.

En terme de temps de calcul, les résultats de UM-CRT sont excellents. Là où une simulation déterministe prend plusieurs jours, la même simulation réalisée avec UM-CRT ne dure que quelques minutes. L'objectif de réduction du temps de simulation avec une couche physique semi-déterministe est pleinement atteint.

Pour conclure, nous avons montré que la couche physique développée présente de très bonnes performances. La précision par rapport à une approche déterministe est très bonne, exceptée une évaluation optimiste de la qualité du lien radio au delà de 20 dB, mais sans conséquence pénalisante pour la plupart des applications VANETS. Quoiqu'il en soit, cette éventuelle faiblesse est largement compensée par le gain considérable en temps de calcul obtenu qui atteint un facteur 50.

2.3 Analyse de performances de la plate-forme VANET

L'objectif de la plateforme est d'effectuer des simulations de réseaux VANETs. Les réseaux VANETs nécessitent l'utilisation conjointe d'un modèle de mobilité avec un simulateur de réseau qui possède une couche physique réaliste, pour être étudié dans des conditions les plus proches possibles de la réalité. Notre couche physique semi-déterministe obtient de très bons résultats en terme de TEB, comparativement au modèle purement déterministe, et ceci en réduisant considérablement le temps de calcul. La dernière étape pour valider définitivement la plate-forme est d'effectuer des simulations VANETs et de comparer des métriques issues de couches plus hautes, comme la couche routage par exemple. Le simulateur de réseaux NS2 sera le support de cette étude.

2.3.1 La plate-forme de simulation VANETs

La méthode d'intégration de notre modèle de couche physique basé sur UM-CRT et 802.11p dans le simulateur NS-2, est dépendante d'un modèle d'erreur. Notre modèle d'erreur provient des travaux de Hamidouche et al. [27], qui ont été inclus dans le simulateur NS-2 avec CRT. Les auteurs de la référence [27] étudient l'impact d'une couche physique réaliste sur les transmissions vidéo H.264/AVC dans les réseaux Ad Hoc en environnement urbain. Ils proposent également un modèle d'erreur qui est basé sur le calcul du TEB. C'est ce modèle qui a été utilisé dans cette thèse.

La décision de la perte d'un paquet ou non se fait ensuite au niveau MAC en fonction des informations du TEB et de la puissance reçue, issues de la couche physique. Concrètement, la décision de la perte ou de la réception d'un paquet est effectuée en comparant le taux de perte de paquets (lui même calculé à partir du TEB) avec une variable aléatoire compris entre 0 et 1. Si le taux de perte de paquets est supérieur à la variable, le paquet sera considéré comme perdu, et dans le cas contraire comme reçu.

La *figure 2.14* montre un exemple d'une application de la plate-forme NS-2/UM-CRT dans notre environnement de simulation avec des immeubles (représentés en rouge). Cette figure montre une représentation instantanée d'un scénario à 40 véhicules avec des communications multiples.

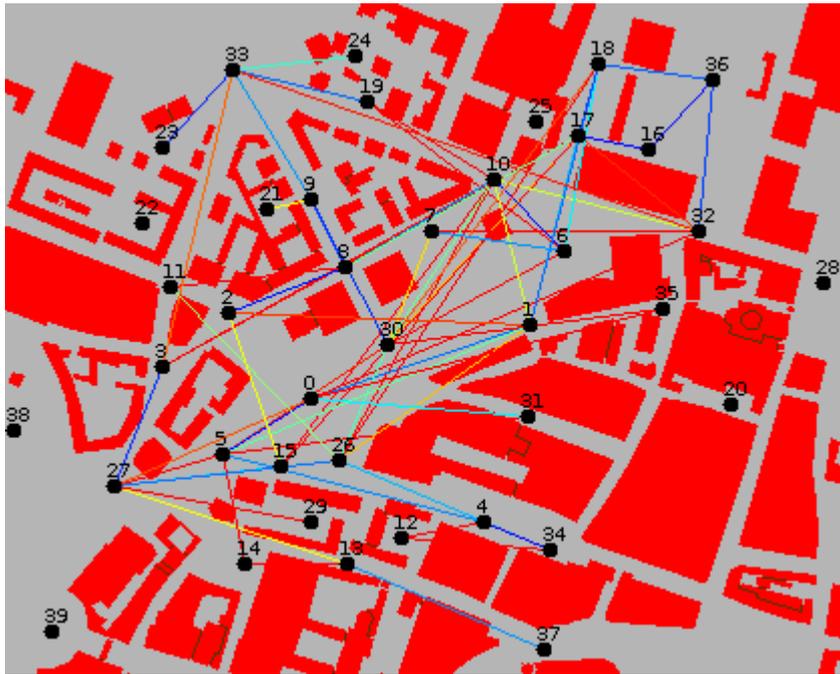


Figure 2.14 : Représentation instantanée de la qualité du lien radio en terme de TEB entre des véhicules dans le centre ville de Munich.

Les lignes colorées de la *figure 2.14* représentent les valeurs de TEB entre chaque couple de véhicules émetteur-récepteur. Les couleurs servent à caractériser la qualité du lien radio : plus sombre est la couleur et plus grand est le TEB, et donc plus mauvaise est la liaison. Cet outil de visualisation, permettant de voir les valeurs de TEB, est utile pour déterminer facilement si une route entre deux nœuds est appropriée ou non.

Dans le cadre de cette thèse, le simulateur NS-2 modifié utilise les réponses impulsionnelles calculées avec le modèle de propagation SCME-UM, et calcule le TEB correspondant en utilisant l'un des standards 802.11 détaillés précédemment (IEEE.802.11.p et n). Chaque valeur de TEB donne alors une information précise sur la qualité des liens entre les nœuds. Cette information permet ensuite de calculer un Taux d'Erreurs par Paquets (TEP).

Pour résumer, cette couche physique réaliste sert de support aux couches hautes du modèle OSI dans NS-2. Ces étapes sont illustrées sur la *figure 2.15*.

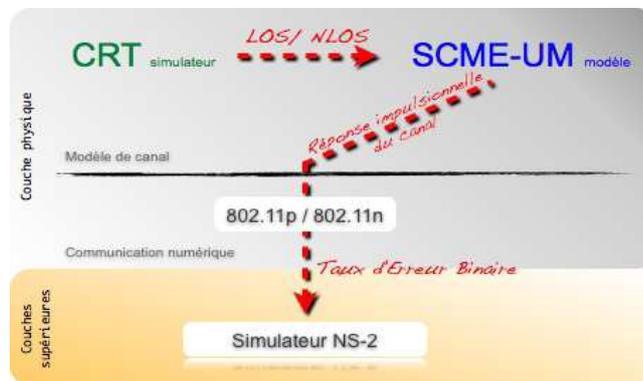


Figure 2.15 : Intégration de UM-CRT dans NS2.

La *figure 2.15* montre clairement comment le modèle UM-CRT est intégré à la couche physique réaliste, et elle-même au sein de NS2. Le simulateur de réseau NS-2 ainsi modifié répond bien aux exigences des VANETs. Combiné à un modèle de mobilité, il permet donc de répondre aux challenges des simulations réalistes de réseau VANET. Cette plate-forme NS-2 constitue alors un simulateur de réseau adapté pour les VANETs qui permet d'évaluer leurs performances avec des conditions de transmission réalistes dans un environnement donné.

2.3.2 Les paramètres de simulations

Pour mettre en oeuvre cette plate-forme, il est indispensable de la paramétrer en termes de scénarios de mobilité, de chaîne de transmission, de nombre de noeuds communicants et de communications simultanées,

Tout d'abord, afin de pouvoir associer des scénarios de mobilité réalistes dans l'environnement de simulation, le simulateur de mobilité VanetMobiSim a été utilisé pour générer 30 scénarios différents. Ce nombre a été retenu pour obtenir des résultats statistiques en un temps raisonnable. Ces scénarios sont définis avec différents points de départ, différentes configurations de feu de croisement ainsi que différents parcours. La vitesse des noeuds est limitée à 16 m/s, ce qui correspond à 50 km/h.

Chacun de ces scénarios a donné lieu à des simulations effectuées en SISO à la fréquence de 5,9 GHz dans un environnement urbain, le centre-ville de Munich.

Dans chaque scénario, une communication entre deux noeuds est un flux UDP à débit constant (Constant Bit Rate – CBR). Il y a 10 flux simultanés par scénario. La taille des paquets est différente pour chaque flux. Elle peut prendre une valeur entre 64 et 2048 octets.

Le protocole de routage utilisé pour ces simulations est AODV dans sa forme basique.

Dans l'objectif d'évaluer les performances de notre proposition, des simulations vont être réalisées avec différents modèles de propagation.

Comme expliqué dans le *chapitre 2.2.1*, le modèle UM-CRT existe sous deux versions différentes : l'une comprenant la réponse impulsionnelle complète, et l'autre comprenant une réponse impulsionnelle simplifiée pour déterminer uniquement le cas LOS ou NLOS. Les deux variantes du modèle sont présentées. Pour comparer CRT et UM-CRT avec des modèles statistiques et empiriques reconnus et implantés dans NS-2, nous avons réalisé des simulations avec les modèles FreeSpace, à exposant dont β était choisi à 2,7 et le modèle Nakagami avec les paramètres Highway101.

Enfin, notons qu'aucun résultat obtenu exclusivement avec le modèle statistique SCME-UM ne sera présenté. En effet, selon que le modèle soit paramétré en LOS ou NLOS, les résultats obtenus sont systématiquement parfaits ou nuls. Par exemple, le taux de paquets obtenu lors d'une simulation avec le modèle statistique est systématiquement de 100% dans le cas LOS, et de 0% dans le cas NLOS. Ceci s'explique par le fait que le modèle statistique paramétré en LOS va considérer que tous les liens de la simulation sont en visibilité directe et donc la puissance reçue sera très bonne. Les résultats obtenus par ce modèle sont quasiment du même ordre que ceux obtenus avec les modèles empiriques tels que Friis. A l'inverse, le modèle statistique paramétré en NLOS va considérer que tous les liens de la simulation n'ont pas de trajet direct. Les résultats seront donc catastrophiques, aucun ne pourra communiquer.

Le tableau 2 résume les paramètres importants des simulations :

Simulateur de réseau	NS 2.34
Modèle de propagation	FreeSpace, Shadowing, Nakagami, CRT, UM-CRT
Simulateur de mobilité	VanetMobiSim
Modèle de mobilité	Random trip & Intelligent driver model
Environnement de simulation	Centre-ville de Munich
Temps de simulation	60 secondes
Couche physique	802.11p (SISO)
Débit	6 MBits/s
Fréquence	5,9 GHz
Protocole de routage	AODV
Nb de flux UDP simultanées	10
Taille des paquets	64 / 128 / 256 / 512 / 1024 bytes

Tableau 2: Paramètres des simulations.

2.3.3 Étude comparative globale

Les résultats de différentes couches physiques incluant CRT et UM-CRT en mode SISO (norme 802.11p) sont présentés. La comparaison est tout d'abord faite en terme de taux de paquets reçus entre l'émetteur et le récepteur. Ce critère a été choisi car c'est le critère le plus communément utilisé dans les évaluations de performances des VANETs. Le deuxième critère de comparaison est le temps de distribution d'un paquet à un récepteur, plus communément appelé le délai. Le dernier critère étudié est le taux de paquets de routage ou surcoût de routage (routing overhead). Du fait de l'augmentation de la consommation de bande passante qu'un protocole de routage génère, ce critère a une grande importance.

Les figures 2.16, 2.17 et 2.18 présentées montrent les résultats moyens et l'écart type des 30 scénarios de simulation en terme de taux de paquets reçus, taux de paquets de routage et délais de transmission en fonction du modèle de propagation utilisé. Ainsi, l'impact du modèle semi-déterministe UM-CRT dans le simulateur NS-2 est évalué comparativement à d'autres modèles.

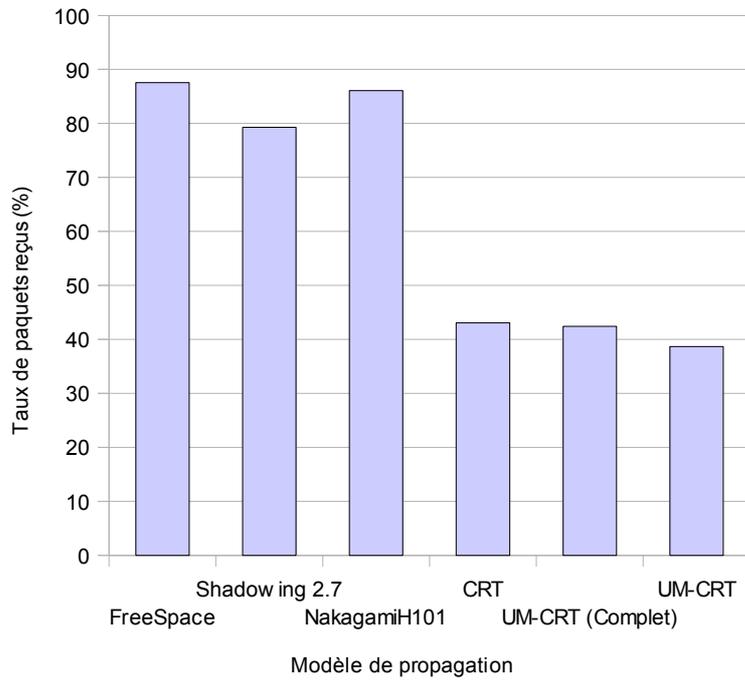


Figure 2.16 : Taux de paquets reçus en fonction du modèle de propagation.

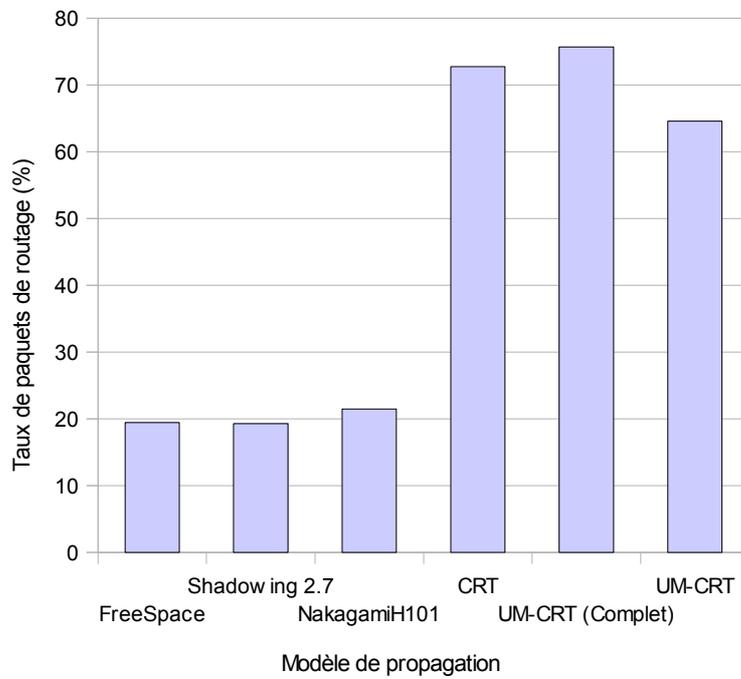


Figure 2.17 : Taux de paquets de routage en fonction du modèle de propagation.

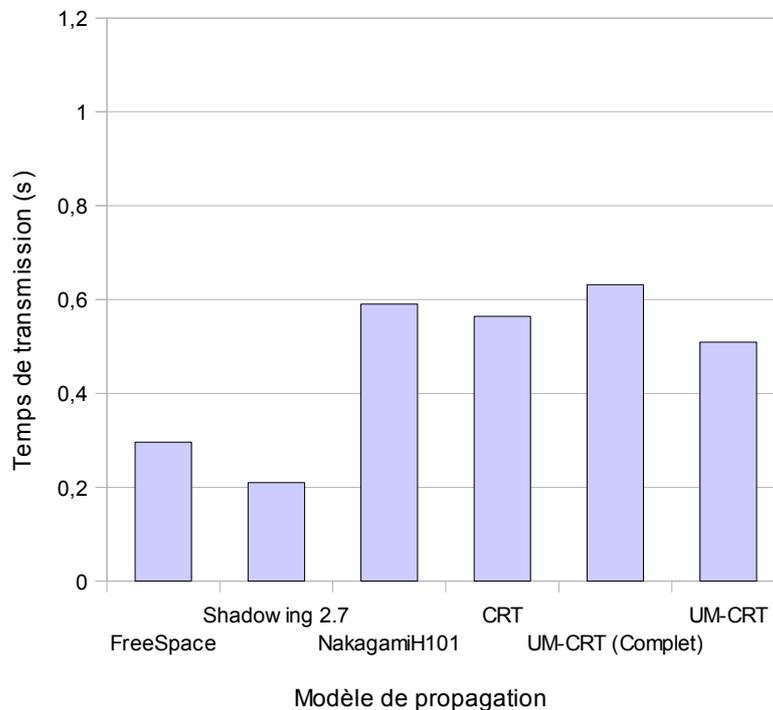


Figure 2.18 : Temps de transmission en fonction du modèle de propagation.

Les résultats présentés dans les figures 2.16, 2.17 et 2.18 montrent clairement l'écart de résultats entre les modèles qui ne prennent pas en compte les paramètres de l'environnement et les modèles qui s'en préoccupent. Les résultats obtenus avec les modèles FreeSpace, exposant/shadowing et Nakagami sont très optimistes par rapport à la référence, c'est-à-dire le modèle déterministe CRT. Par exemple, on voit sur la figure 2.16 qu'en terme de taux de paquets reçus, les modèles FreeSpace, Shadowing et Nakagami obtiennent des résultats compris entre 80% et 90%. Les résultats du modèle déterministe montrent des résultats deux fois moins bons, avec environ 40% de paquets reçus. Le même constat s'applique aux autres métriques étudiées. Globalement, entre les trois premiers modèles et les autres, on constate que le taux de paquets reçus est diminué de moitié, le taux de paquets de routage est triplé et le temps de transmission est également multiplié par trois. Ces résultats viennent conforter le postulat de départ quant à l'utilisation des modèles qui ne prennent pas en compte les paramètres de l'environnement, et vont dans le même sens que les autres travaux du domaine [1][5][6].

Cela s'explique simplement par le fait que les atténuations de puissance calculées par les trois premiers modèles utilisés ne tiennent pas compte de l'environnement et sont minimales. Par conséquent, la portée de chaque nœud est largement surévaluée par rapport à ce qui se passe dans la réalité. Les modèles FreeSpace, Shadowing et Nakagami ne nécessitent que peu de paquets de routage car, avec ces modèles, les communications sont possibles directement entre l'émetteur et le récepteur. Les mécanismes de routage sont donc très peu utilisés et le temps de transmission est très court.

Il faut cependant noter que le temps de transmission obtenu par le modèle de Nakagami est assez équivalent à celui obtenu par les modèles réalistes (cf. *figure 2.18*). L'écart type est en revanche extrêmement grand et demande des investigations plus précises présentées lors de l'approfondissement des résultats.

Enfin, par rapport à la validité du modèle UM-CRT, si on compare les différents résultats obtenus avec UM-CRT par rapport à la référence CRT, on constate un écart inférieur à 10%. Le comportement du modèle semi-déterministe se rapproche du modèle déterministe quel que soit le critère. Ainsi, alors que le temps de simulation a été réduit d'un facteur 50 environ (cf. *chapitre 2.2.3*), les résultats produits par le modèle semi-déterministe (quelle que soit la version) restent réalistes.

On constate cependant une différence plus prononcée entre CRT et UM-CRT qu'entre CRT et UM-CRT complet. Ceci s'explique par la prise en compte des zones de stationnarité dans les modèles CRT et UM-CRT. En effet, une des optimisations du modèle CRT concerne l'utilisation de zone de stationnarité pour limiter les calculs de RI (cf *Chapitre 2.2.1*), et cette optimisation n'est pas présente dans le modèle UM-CRT au même niveau. Ainsi, la zone de stationnarité au niveau des RI de CRT existe pour les modèles CRT et UM-CRT complet mais pas dans le modèle UM-CRT, d'où la différence des résultats.

Finalement, le bilan est très positif pour les deux versions de UM-CRT car l'amélioration en terme de temps de simulation est de l'ordre de 98% par rapport au modèle déterministe (cf. *chapitre 2.2.3*), et la perte, en terme de fiabilité des résultats, reste inférieure à 10%. Les modèles empiriques sont, quant à eux, bien loin de la réalité avec un comportement uniforme quelle que soit la configuration de simulation. On voit bien qu'ils ne prennent pas du tout en compte les éléments de l'environnement, et la nécessité d'utiliser un modèle réaliste est à nouveau montrée.

De plus, l'utilisation de l'unique critère LOS / NLOS permet de donner des résultats de simulation fiable. Les hypothèses qui ont été faites lors de la création du modèle (cf. *chapitre 2.2.1*) sont donc validées par ces résultats.

2.3.4 Étude comparative précise

La *figure 2.19* montre les résultats de taux de paquets reçus en fonction du modèle de propagation pour les 30 scénarios étudiés.

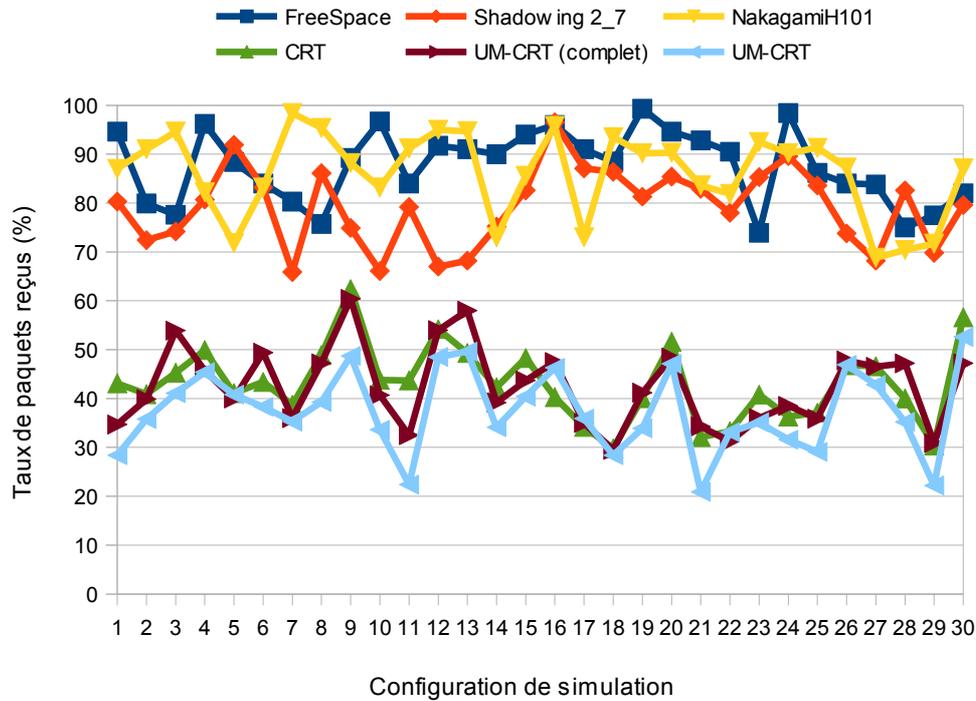


Figure 2.19 : Taux de paquets reçus en fonction du modèle de propagation.

La *figure 2.19* met encore une fois en évidence les différences entre les modèles qui prennent en compte l'environnement de propagation et les autres. On constate que, quelle que soit la configuration de simulation, les résultats des modèles FreeSpace, Shadowing et Nakagami sont très optimistes et très éloignés des résultats des modèles déterministes et semi-déterministes. On constate également que, selon la configuration de simulation, les résultats des modèles FreeSpace, Shadowing et Nakagami en terme de taux de paquets reçus sont complètement décorrélés du modèle CRT. Ainsi, on montre bien que, aussi bien en valeurs moyennes qu'au cas par cas, ces modèles ne permettent pas de caractériser de façon réaliste le comportement du canal. En revanche, la *figure 2.19* montre que le comportement du modèle UM-CRT est très similaire au modèle déterministe, quelle que soit la version de UM-CRT. De plus, la corrélation des résultats est très nette entre les modèles semi-déterministes et le modèle déterministe. Finalement, le modèle UM-CRT permet de caractériser de manière réaliste le comportement du canal en terme de taux de paquets reçus.

Pour les 30 scénarios étudiés, la *figure 2.20* montre les résultats en nombre de paquets de routage selon le modèle de propagation.

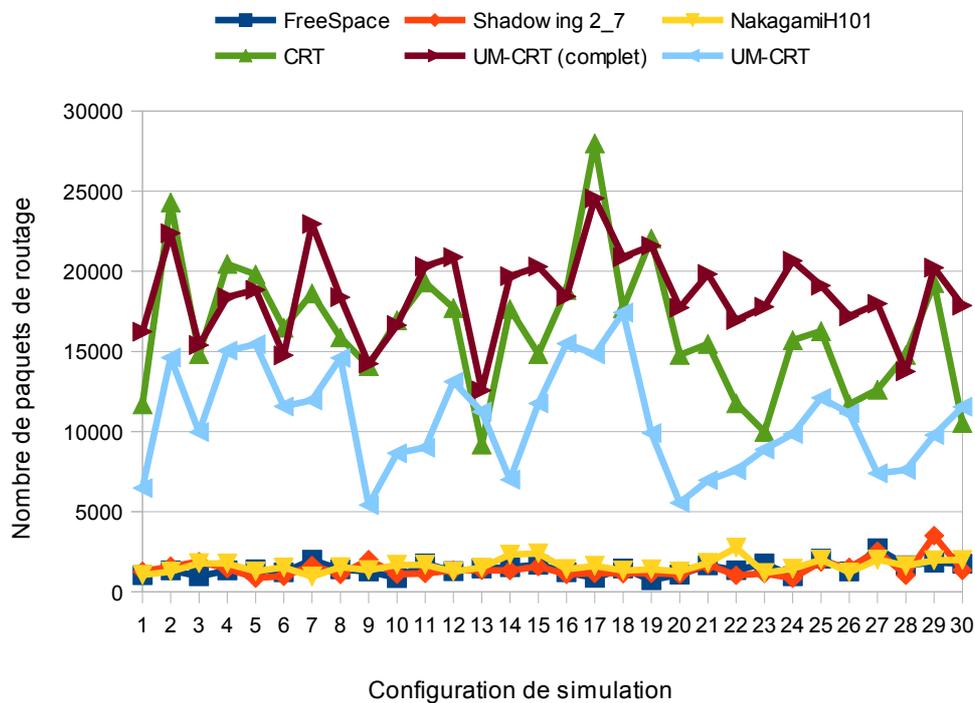


Figure 2.20 : Nombre de paquets de routage en fonction du modèle de propagation.

La *figure 2.20* montre de manière encore plus flagrante les constatations énoncées précédemment. Il est évident que les résultats des simulations avec les modèles FreeSpace, Shadowing et Nakagami sont extrêmement optimistes en terme de paquets de routage. Dans les simulations qui impliquent ces modèles, on trouve environ 1 000 à 3 000 paquets de routage, alors que les mêmes simulations effectuées avec le modèle déterministe en décomptent 10 000 à 20 000, c'est-à-dire 10 fois plus. Le modèle semi-déterministe quant à lui reste fidèle au modèle déterministe en terme de fluctuation du nombre de paquets de routage par simulation. Le modèle UM-CRT complet offre ici une meilleure fiabilité des résultats en terme de paquets de routage que le modèle UM-CRT. Ceci s'explique par l'incertitude existante ou non sur le calcul des trajets LOS et NLOS. Cependant, l'écart de résultats entre le modèle CRT et le modèle UM-CRT (quelle que soit la version) ne dépasse pas 10% et les résultats restent satisfaisants en terme de réalisme proportionnellement au gain de temps apporté. Les questions que l'on peut se poser, quant au plus grand nombre de paquets de routage avec les modèles réalistes qu'avec les modèles empiriques, sont les suivantes : est-ce qu'il y a plus de ruptures de routes avec les modèles réalistes ? Y a-t-il plus de signalisations pour reconstruire les routes ? Ces questions seront évoquées dans le *chapitre 3*.

La *figure 2.21* montre maintenant les résultats par scénario du temps de transmission en fonction du modèle de propagation.

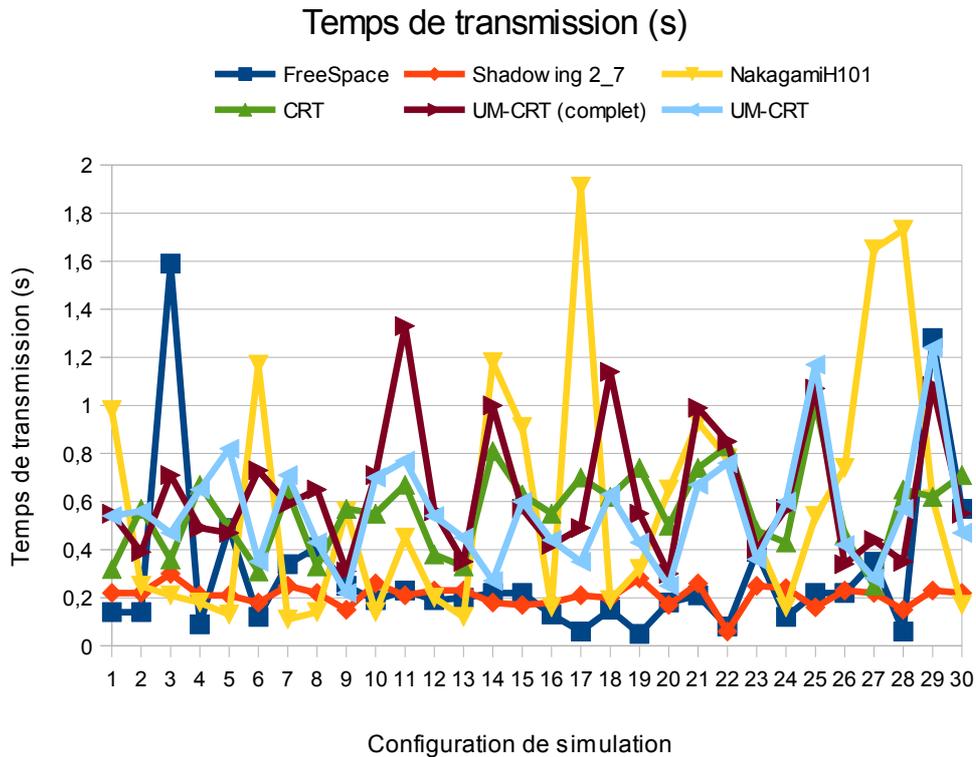


Figure 2.21 : Temps de transmission en fonction du modèle de propagation.

La figure 2.21 se distingue des autres courbes car les résultats du modèle Nakagami sont très fluctuants d'un scénario à l'autre. Ainsi, bien que les résultats moyens du modèle de Nakagami soient proches de CRT en terme de temps moyen de transmission, le comportement des résultats au cas par cas n'est absolument pas corrélé avec le modèle déterministe. L'écart type des résultats du modèle Nakagami (cf. figures 2.18 et 2.21) est très important. C'est cependant la seule différence notable. En ce qui concerne les modèles FreeSpace, Shadowing et UM-CRT, les conclusions sont les mêmes que pour les figures 2.19 et 2.20. Il faut ajouter que le temps de transmission peut être mis en regard du nombre de sauts nécessaires entre l'émetteur et le récepteur. Le nombre de sauts moyens obtenus lors des simulations ne dépasse pas 1,5 avec les modèles FreeSpace, Shadowing et même Nakagami, alors qu'il est supérieur à 2,5 avec les modèles déterministes et semi-déterministes.

L'ensemble des résultats présentés ici confirme la nécessité de s'affranchir des modèles de propagation qui ne prennent pas en compte les paramètres de l'environnement. Les résultats montrent également la fiabilité du modèle UM-CRT en terme de résultats de taux de paquets reçus, de taux de paquets de routage et de temps de transmission. Ainsi, le modèle UM-CRT permet de gagner un temps de calcul considérable comparativement au modèle déterministe CRT, et ses résultats permettent de valider le modèle UM-CRT (dans ses deux versions) en terme de réalisme. La version UM-CRT complet n'est plus abordée dans la suite de cette thèse car elle est moins performante en temps de calcul que la version UM-CRT. Les simulations effectuées dans la suite de cette thèse sont effectuées avec le modèle UM-CRT.

2.3.5 Les limites du modèle

Le modèle UM-CRT est un modèle semi-déterministe qui permet d'effectuer des simulations de VANETs réalistes avec un temps de calcul tout à fait raisonnable. Cependant, ce modèle ne peut pas être utilisé en toute situation. Il y a certaines conditions à respecter, en effet, dans certains cas, le modèle ne permet pas de simuler les VANETs de manière réaliste. Ce sont ces situations qui vont être exposées dans cette partie.

La *figure 2.22*, présentée ici, montre la différence de taux de paquets reçus entre CRT et UM-CRT obtenue pour 4 configurations de simulation avec 4 mobilités différentes en terme de vitesse :

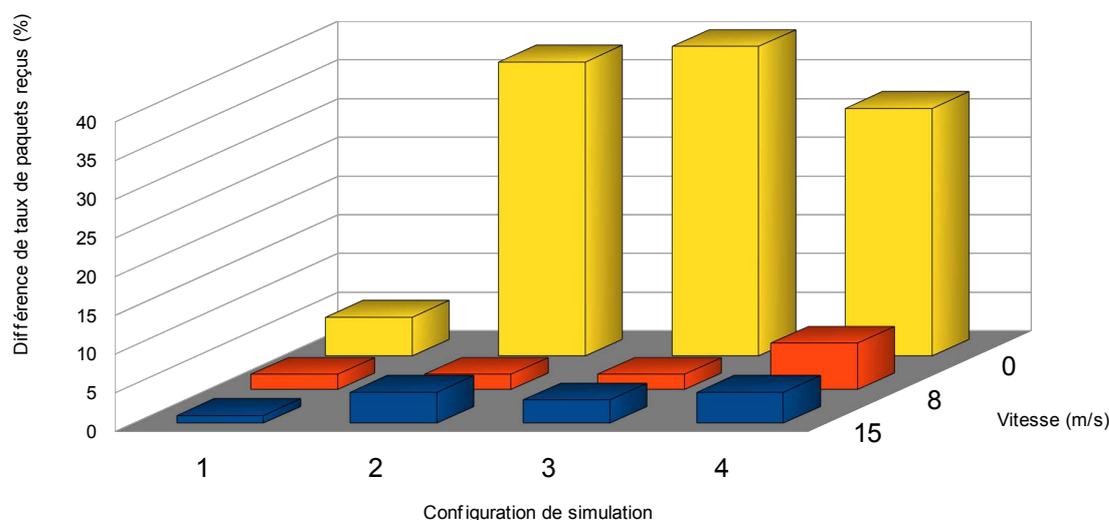


Figure 2.22 : Écart des résultats en terme de taux de paquets reçus entre CRT et UM-CRT.

Les résultats de la *figure 2.22* font clairement apparaître les différences en terme de résultats entre CRT et UM-CRT dans les cas statiques. Cette remarque n'est pas uniquement valable pour le taux de paquets reçus, le même comportement se retrouvant pour les autres critères (non présentés ici). L'explication vient des TEB du modèle semi-déterministe qui sont limités en quantité et n'ont de validité statistique que dans les cas de mouvement dans l'environnement. Les résultats peuvent être justes, mais ils peuvent aussi être complètement erronés, et il n'y a aucun moyen de contrôle. Il ressort de ces simulations que le modèle UM-CRT n'est pas adapté aux situations statiques. L'un des éléments doit être mobile pour que le modèle soit valide en terme de résultat.

Cette limite restreint l'utilisation du modèle au cas de mobilité. Cependant, les VANETs étant massivement mobiles, le modèle reste bien adapté à leur utilisation. Même en situation de feu rouge ou de stop, la scène ne reste pas statique de par le mouvement des autres véhicules. Cependant, certains cas de figure posent problème : par exemple une simulation VANET en parking où chaque véhicule serait susceptible de transmettre, de relayer de l'information, ou encore, une simulation n'incluant que des infrastructures sans la présence de véhicules. Mais ces cas de figure étant des cas particuliers, le modèle UM-CRT est donc adapté à la majorité des situations VANETs.

Conclusion

Ce chapitre a tout d'abord présenté les différentes méthodes de modélisation de la propagation des ondes et plus particulièrement celles existant dans les simulateurs de réseaux VANETs. Les principales contraintes de chacun des modèles ainsi que la problématique du choix du modèle pour réaliser des simulations réalistes ont été mises en avant. Ensuite, des solutions à cette problématique ont été explicitées, tout en montrant les avantages et inconvénients de chacune des solutions. Finalement, la contribution UM-CRT a été explicitée.

La proposition du modèle UM-CRT est une contribution de cette thèse et a pour but de répondre à la problématique du choix du modèle de propagation pour les simulations VANETs. Le but de UM-CRT est de pouvoir réaliser des simulations de réseaux VANETs de manière fiable et efficace avec un temps de calcul raisonnable. C'est un modèle semi-déterministe basé sur le simulateur déterministe CRT et sur le modèle statistique SCME-UM. Couplé à une chaîne de transmission simulant les normes 802.11p et 802.11n aussi présentées, l'ensemble est intégré dans le simulateur de réseau NS-2.

L'évaluation du modèle UM-CRT est ensuite décrite. Les résultats des simulations utilisant UM-CRT sont comparés à ceux obtenus avec plusieurs autres modèles, notamment ceux du modèle déterministe CRT. La conclusion de l'analyse est que le modèle est adapté à la simulation des réseaux VANETs. Les objectifs de gain de temps de calcul et de conservation de la fiabilité des résultats par rapport à un modèle déterministe sont atteints. Les limites du modèle sont également explicitées.

Finalement, la contribution UM-CRT est appropriée pour réaliser des simulations de réseaux VANETs. L'ensemble que constituent le simulateur de mobilité VanetMobiSim associé au modèle UM-CRT et au simulateur de réseau NS-2 a été présenté dans ce chapitre. Cet ensemble servira de support à l'étude des VANETs présentée dans le chapitre suivant.

Bibliographie

- [1] M. Günes, M. Wenig, A. Zimmermann, “Realistic Mobility and Propagation Framework for MANET Simulations”, Proceedings of the 6-th International Conference on Networking, Networking 2007, USA, 2007.
- [2] Francisco J. Martinez, Chai-Keong Toh, Juan-Carlos Cano, Carlos T. Calafate, Pietro Manzoni, “Realistic Radio Propagation Models (RPMs) for VANET Simulations”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2009, 2009.
- [3] A.Mahajan, N.Potnis, K.Gopalan, A.Wang, “Modeling vanet deployment in urban settings”, International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems 2007, 2007.
- [4] 3GPP, “Spatial channel model for MIMO simulations”, TR 25.996 V9.0.0 (2009-12) [Online]. Available: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.996/25996-900.zip
- [5] R. Delahaye, A.M. Poussard, Y. Pousset, R. Vauzelle, “Propagation Models and Physical Layer Quality Criteria Influence on Ad hoc Networks Routing”, 7th ITST, 2007.
- [6] D. Dhoutaut, A. Regis, F. Spies, “Impact of Radio Propagation Models in Vehicular Ad Hoc Networks Simulations”, VANET’06, 2006.
- [7] D. Dessales, “Conception d’un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation”, PHD Thesis, University of Poitiers, France, 2011.
- [8] J.D. Parsons, “The Mobile Radio Propagation Channel , Second Edition”, Wiley, 2000.
- [9] <http://theses.edel.univ-poitiers.fr/theses/2010/Hamidouche-Wassim/2010-Hamidouche-Wassim-These.pdf>
- [10] W. Hamidouche. “Stratégies de transmission vidéo sur un canal MIMO réaliste”, PhD thesis, Université de Poitiers, France, 2010.
- [11] K.S. Yee. “Numerical solution of initial boundary value problems insolving maxwell’s equations in isotropic media”, IEEE Antennas and Propagation, pages 302–307, 1966.
- [12] R.F. Harrington. “Field computation by moment methods”, Wiley, 1968.
- [13] RS Longhurst. “Geometrical and Physical Optics 2nd edition”, New York, Wiley, 1967.
- [14] R.G. Kouyoumjian, P.H. Pathak. “A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface”, Proceedings of the IEEE, pages 1448–1461, 1974.
- [15] H. Ling, R.C. Chou, S.W. Lee. “Shooting and Bouncing Rays : Calculating the RCS of an Arbitrarily Shaped Cavity”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pages 194–205, 1989.
- [16] G.E. Athanasiadou, A.R. Nix, “A novel 3-d indoor ray-tracing propagation model : The path generator and evaluation of narrow-band and wide band prediction”, IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2000.
- [17] L. Aveneau, Y. Pousset, R. Vauzelle, M. Mériaux, “Development and Evaluations of Physical and Computer Optimizations for the 3D UTD Model”, AP2000 Millennium Conference on Antennas & Propagation (poster), 2000.
- [18] M. Paetzold, “Mobile Fading Channels”, Wiley, 2002.
- [19] <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25996.htm>

[20] <http://www.ist-winner.org/>

[21] D. S. Baum, J. Hansen, J. Salo, “An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM)”, IEEE 61st Vehicular Technology Conference, VTC-Spring 2005.

[22] M.F. Pop, N.C. Beaulieu, “Limitations of sum-of-sinusoids fading channel simulators”, IEEE Transaction Communication, vol. 49, 2001.

[23] “IEEE Standard for information technology - Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements”, Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE std 802.11p, 2010.

[24] http://radio.tkk.fi/en/research/rf_applications_in_mobile_communication/radio_channel/scme-2006-08-30.zip

[25] <http://sourceforge.net/apps/wordpress/itpp/>

[26] “IEEE Standard for Information Technology”, Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification, Amendment : High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band (802.11a), 2009.

[27] W. Hamidouche, R. Vauzelle, C. Olivier, Y. Pousset, C. Perrine, “Impact of realistic MIMO physical layer on video transmission over mobile Ad Hoc network”, 20th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium 2009 (PIMRC'09), Tokyo, 2009.

Chapitre 3 - Optimisation de la qualité de service par une approche routage et cross-layer

Introduction

La mise en œuvre *in situ* de réseaux expérimentaux VANETs (Vehicular Ad-hoc NETWORKs) demandant des investissements très importants, l'étude par simulation est donc une alternative incontournable. Pour obtenir un réalisme suffisant, elle nécessite l'association de trois composants principaux qui sont : un simulateur de mobilité, un simulateur de réseau et un modèle de propagation réaliste. Ces trois éléments doivent être choisis et combinés avec le plus grand soin pour former une plate-forme de simulation VANET qui alliera efficacité et réalisme.

Dans les simulations de réseaux VANETs, l'utilisation de modèles de mobilité simplistes ou de modèles de propagation non réalistes peut conduire à des résultats optimistes, voire erronés. En effet, lors de la propagation des signaux, les interactions avec l'environnement affectent la qualité des liens et cet élément majeur est le plus souvent sous-estimé (*cf. figure 3.1*).

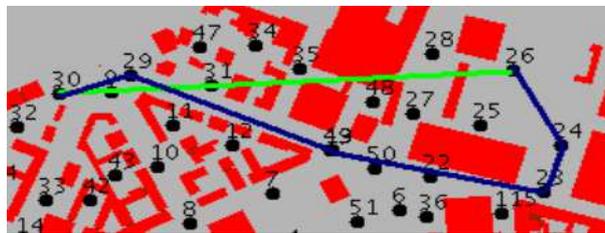


Figure 3.1 : Communication entre deux véhicules avec deux modèles de propagation différents.

La *figure 3.1* montre une communication entre deux véhicules (représentés par les nœuds 26 et 30) dans un environnement urbain avec un modèle de propagation Free-Space classique (vert) et un modèle de propagation réaliste à tracé de rayons (bleu). Elle illustre le problème lié à l'utilisation d'un modèle de propagation simpliste qui ne rend pas compte de l'environnement entre les nœuds, ici les bâtiments étant représentés en rouge. En effet, la communication se fait en un seul saut avec le modèle Free-Space, sans tenir compte des bâtiments, alors que dans le cas du modèle à tracé de rayons, la communication se fait en 5 sauts. On comprend bien que le modèle Free-Space n'est pas adapté pour ce genre de situation. La référence [1] illustre ce phénomène et montre les résultats optimistes que l'on peut obtenir avec l'utilisation d'un modèle simple tel que le modèle en espace libre (Free Space).

L'optimisation des performances des réseaux VANETs est une étape essentielle pour permettre des communications fiables. En effet, la forte mobilité générée par les nœuds des réseaux VANETs engendre de nombreux problèmes de communication. Avant de songer à mettre en place toute application, il faut d'abord s'assurer que la communication est possible entre les terminaux, ce qui n'est pas toujours le cas. Les communications multi-sauts nécessitent de communiquer entre deux nœuds *via* des nœuds-relais : ce sont les protocoles de routage. La découverte et l'actualisation des chemins est donc une étape nécessaire à l'établissement d'une communication dans les VANETs.

Dans le *chapitre 1*, le simulateur de réseau NS-2 a été présenté ainsi que le simulateur de mobilité VanetMobiSim. Dans le *chapitre 2*, le modèle de propagation UM-CRT ainsi que

son intégration au simulateur NS-2 ont été exposés. Le simulateur de mobilité VanetMobiSim associé au simulateur de réseau NS-2, dans lequel nous avons intégré le modèle UM-CRT, forment une plate-forme de simulation permettant l'étude des VANETs dans des conditions réalistes. Cette plate-forme est utilisée dans ce chapitre pour l'étude des protocoles de routage dédiés aux VANETs.

Il existe un grand nombre de mécanismes de routage dédiés aux réseaux Ad Hoc [2], dont les réseaux VANETs sont un sous-ensemble. Comme indiqué précédemment, la plupart des études concernant les protocoles de routage dans un contexte VANETs sont menées par simulation. Il existe des expérimentations, mais celles-ci ne peuvent pas donner de résultats sur un échantillon de plus de quelques véhicules [3] et les méthodes de mesure restent difficiles à mettre en oeuvre [4]. Bien souvent, elles n'incluent pas tous les éléments nécessaires pour obtenir des résultats suffisamment fidèles au monde réel [5][6][7]. Dans [5], la mobilité et le modèle de propagation considérés sont très simplistes (RandomWayPoint et Free-Space). Les auteurs de [6] utilisent un modèle de mobilité réaliste, mais le modèle de propagation qu'ils emploient n'est pas adapté au contexte des VANETs (TwoRayGround). Enfin, dans [7], la proposition intègre bien un modèle de propagation réaliste, mais la mobilité est considérée de manière non réaliste (RandomWayPoint). Aucune de ces propositions ne réunit les trois conditions nécessaires pour une étude dans un environnement de simulation VANET réaliste.

Plusieurs travaux, dont notamment ceux présentés dans la référence [8], montrent que des simulations effectuées dans des conditions non réalistes donnent des résultats inexacts amenant inmanquablement à des conclusions biaisées voir erronées. Aussi, les travaux présentés dans ce chapitre ont pour but d'évaluer des protocoles de routage Ad hoc classiques en conditions de simulation réalistes, puis de proposer des améliorations visant à optimiser leurs performances pour les VANETs. Nous allons procéder par comparaisons successives afin de sélectionner le ou les protocoles de routage et la ou les techniques d'optimisations répondant le mieux aux critères de performances et de qualité de service nécessaires dans les VANETs.

L'objectif d'un protocole de routage est de déterminer le meilleur chemin possible entre deux points d'un réseau, afin de prendre en charge le transport de données entre ces points de la manière la plus efficace possible. Pour ce faire, le protocole de routage s'appuie sur des métriques dont la plus classique et aussi la plus connue est le nombre de sauts. Un protocole de routage agissant habituellement au niveau réseau du modèle OSI, les métriques utilisées sont issues d'informations disponibles à ce niveau. La plate-forme de simulation présentée dans le *chapitre 2* permet cependant d'avoir accès à des paramètres d'autres couches du modèle OSI, notamment de celles de la couche physique. Ainsi, il est possible de concevoir des algorithmes de routage prenant en compte des métriques représentatives de la qualité du lien radio. Cette technique appelée cross-layer laisse entrevoir la possibilité de répondre aux problèmes créés par la mobilité et l'instabilité des liens dans les VANETs.

Ce chapitre a pour objectif de proposer des solutions à ce challenge. Pour ce faire, à l'aide de la plate-forme réaliste de simulation VANETs, nous allons tester et comparer les protocoles de routage entre eux, pour déterminer celui ou ceux qui permettent de pallier au mieux les effets de la mobilité et de l'instabilité des communications dans les VANETs.

Ensuite, en utilisant des paramètres issus de la couche physique dans les algorithmes de routage, nous allons tenter d'optimiser les protocoles les plus performants parmi ceux que nous aurons comparés. Enfin, nous allons combiner les optimisations entre elles pour obtenir les meilleurs résultats possibles.

Le plan de ce chapitre se compose de la manière suivante. Dans un premier temps, la notion de qualité de service est introduite. Ensuite, les protocoles de routage topologiques sont évalués dans un contexte VANETs. Après cela, différents protocoles de routage réactifs sont testés et comparés entre eux dans ce même contexte. La partie suivante présente et compare entre elles différentes optimisations du protocole AODV. Pour clore, la dernière partie propose les solutions qui nous semblent optimales, aussi bien au niveau physique que réseau, pour obtenir les meilleures performances VANETs.

3.1 La qualité de service

En se basant sur la définition donnée dans la recommandation E.800 de l'ITU (International Telecommunications Union) [23], la qualité de service (QoS) peut être définie comme un effet global des performances du service qui déterminent le degré de satisfaction d'un utilisateur du service. Dans les réseaux Ad Hoc, elle peut être définie comme un ensemble de paramètres à positionner afin d'adapter les performances du réseau à celles requises par les applications². La QoS pour les réseaux est un terme très largement employé qui sert à définir et qualifier les niveaux de performances.

En fonction de l'application souhaitée, et du contexte dans lequel l'application sera utilisée, la QoS requise par le réseau ne sera pas la même. En d'autres termes, les performances des réseaux doivent être adaptées au contexte et à l'application souhaitée, ou encore, la QoS demandée pour un réseau dépendra des caractéristiques de ce réseau et des besoins de ses utilisateurs. Les réseaux VANETs étant caractérisés par une forte mobilité des nœuds, répondre à des besoins de QoS dans un tel réseau requiert de s'intéresser aux conséquences de plusieurs paramètres. Ce sont les critères d'évaluation ou de mesure de la QoS tels que : le délai d'acheminement des paquets, le nombre de paquets de signalisation, ou simplement le taux de paquets reçus.

Être capable d'assurer de la qualité de service dans un réseau VANET est un challenge. La thématique des protocoles de routages est une des réponses possibles à ce challenge. En effet, chaque algorithme permettant d'établir des routes entre un émetteur et un récepteur contribue à améliorer ou à détériorer l'une ou l'autre des métriques de QoS. C'est précisément ce que nous allons présenter dans ce chapitre.

Chacune des métriques de QoS permet de classer et comparer les améliorations des protocoles de routage les unes par rapport aux autres. Par exemple, le taux de réception permet d'évaluer la part des paquets arrivés à destination, représentative de l'efficacité ou du « rendement » du réseau. De nombreuses méthodes ont été proposées pour améliorer le taux de paquets reçus car c'est un paramètre clef à améliorer pour les VANETs.

2 Toutes les applications ne nécessitent pas les mêmes performances de la part du réseau pour fonctionner correctement.

Le délai d'acheminement d'un paquet (ou délai de transmission) est égal à la durée qui sépare le moment où le paquet est émis par la source et le moment où il est reçu par la destination. Ce délai dépend de la durée de stockage du paquet dans les files d'attente de chaque nœud intermédiaire, aussi bien au niveau de la couche réseau que MAC, et de la durée de transmission physique du paquet (propagation du signal). Le délai d'acheminement d'un paquet est alors fonction du nombre de relais et donc de la longueur du chemin entre la source et la destination.

La surcharge de trafic de routage, ou routing overhead en anglais, est constituée par les messages transmis dans le réseau pour assurer le fonctionnement des protocoles de routage : établir et maintenir les routes. Ces données sont des messages de signalisation, c'est-à-dire des paquets ne contenant pas de données utilisateur. C'est une métrique comparative qui dépend du nombre de paquets émis. Il faut émettre des quantités de données équivalentes d'une simulation à l'autre pour pouvoir visualiser la surcharge de trafic d'un protocole à un autre. C'est le cas dans nos simulations. L'objectif de QoS est, bien entendu, de diminuer au maximum les paquets de routage pour laisser la priorité aux paquets de données.

Ainsi, un protocole de routage qui privilégierait une métrique au détriment des autres, se positionnerait dans la classe de qualité de service correspondant à cette métrique, et donc aux applications sensibles à cette métrique. Pour donner des exemples concrets, les applications nécessitant un délai de transmission minimum sont les applications d'aide à la sécurité routière. En cas de danger, il faut alerter le plus vite possible. Une application nécessitant un taux de paquets de routage faible serait une application de confort telle qu'Internet, nécessitant un relais d'information dense et constant entre le véhicule utilisant l'application et une ou des bornes fixes.

Enfin, le taux de paquets reçus est une métrique fondamentale commune à toutes les applications. Si on ne reçoit pas de paquets, il n'est pas utile de se poser la question du temps de transmission ou du nombre de paquets de routage. De plus, sans un apport suffisant de données, les applications ne sont pas fonctionnelles.

Les protocoles étudiés dans la suite de ce document peuvent ainsi être classifiés selon leurs mesures de performance.

3.2 Méthodologie de comparaison de protocoles de routage en environnement réaliste

Cette partie présente l'ensemble des paramètres utilisés dans l'environnement dans lequel les simulations sont effectuées, ainsi que la méthode de présentation des résultats qui sera utilisée dans la suite de ce chapitre.

3.2.1 Environnement de simulation

L'ensemble des simulations comparatives sont effectuées sur la base de 30 scénarios de mobilité différents pour chacun des protocoles. Les véhicules se déplacent à vitesse variable de 0m/s à 16m/s selon l'environnement. Leur comportement est modélisé selon les modèles Random trip et Intelligent driver model. Le temps simulé est de 60s. Il y a 10 communications UDP simultanées dans chacun des scénarios et des tailles de paquets différentes pour chaque communication. L'environnement urbain de simulation est le centre ville de Munich (*cf. figure 3.6*). Le *tableau 3.1* résume l'ensemble des paramètres des différentes simulations.

Paramètres	Valeurs
Simulateur de réseau	NS-2 version 2.34
Temps simulé	60 s
Nombre de nœuds	60
Environnement de simulation	Centre ville de Munich - 1000m*1000m
Type de donnée	Constant Bit Rate - CBR
Couche MAC	802.11p
Nombre de flux UDP simultanés	10 transmissions simultanées
Débit paquets	10 paquets/s
Tailles des paquets	64 / 128 / 256 / 512 / 1024 bytes
Débit de la couche physique	6 Mbps
Modèle de propagation	UM-CRT
Puissance de transmission	100 mW
Simulateur de mobilité	VanetMobiSim
Modèle de mobilité	Random trip & Intelligent driver model
Vitesse	Variable entre 0m/s et 16 m/s
Points de départ et mouvements des véhicules	Aléatoirement choisis selon 30 graines différentes

Tableau 3.1 : Paramètres de simulation.

Concernant la mobilité, chacune des 30 distributions aléatoires donne des positions initiales différentes, des trajets différents et des positionnements des feux de croisements différents, générant ainsi 30 scénarios de mobilité complètement différents les uns des autres.

Chacune des simulations comporte 10 communications émetteur/récepteur simultanées : 4/17, 3/10, 3/1, 5/16, 8/7, 9/15, 15/14, 16/19, 18/2 et 19/5 qui seront numérotées de 1 à 10. Le *tableau 3.2* résume l'ensemble de ces communications avec leurs tailles de paquets associées :

Numéro de la communication	Émetteur	Récepteur	Taille des paquets
1	4	17	256 bits
2	3	10	128 bits
3	3	1	512 bits
4	5	16	128 bits
5	8	7	256 bits
6	9	15	512 bits
7	15	14	1024 bits
8	16	19	512 bits
9	18	2	512 bits
10	19	5	64 bits

Tableau 3.2 : Paramètres des communications.

C'est avec cet ensemble de paramètres que chacune des simulations sera effectuée par la suite. Comme la mobilité est différente d'une configuration de simulation à l'autre, les communications changent. En effet, chacun des noeuds est situé dans une zone différente pour chaque configuration. Leurs déplacements et leurs vitesses sont également différents. L'ensemble des configurations permet ainsi d'avoir une appréciation globale de chaque protocole.

3.2.2 Présentation des résultats

Les mesures ou critères de performances permettant de comparer les protocoles sont variés. Ces travaux s'intéressent à plusieurs métriques fondamentales, telles que le taux de paquets reçus, le taux de paquets de routage, le temps de transmission, le temps de routage, le nombre moyen de sauts ou encore le nombre de ruptures de routes. L'ensemble de ces métriques permet de quantifier les performances des protocoles de routage utilisés.

Les résultats moyennés et les résultats détaillés sont présentés pour une compréhension plus approfondie des éléments clefs d'une simulation. Les résultats de l'ensemble des 30 configurations de simulations permettent d'avoir une évolution globale de chaque protocole et de montrer son comportement d'espèce dans toutes les situations possibles. Les résultats au cas par cas montrent les spécificités d'un protocole dans une situation particulière. Ils permettent aussi d'approfondir de manière détaillée leurs performances et montrent si l'un des protocoles est systématiquement meilleur que les autres, ou si au contraire, le résultat dépend de chaque configuration.

L'ensemble de ces résultats sera utilisé pour sélectionner le ou les protocoles les plus performants pour les VANETs.

3.3 Évaluation de protocoles topologiques

Les protocoles de routage permettent de construire des chemins multi-sauts qui permettent d'acheminer des paquets vers un (ou des) nœud(s) destinataire(s). En raison du grand nombre de protocoles disponible grâce à la communauté scientifique, et de la difficulté à tous les classer de manière hiérarchique, il paraît impossible de vouloir tester tous les protocoles ad hoc existants. Dans cette thèse, nous nous focaliserons sur les protocoles de routages *unicast*, c'est-à-dire avec une seule source et une seule destination, et plus précisément sur les protocoles topologiques, c'est-à-dire ceux qui déterminent eux-mêmes la topologie du réseau avec des messages de contrôle.

La partie suivante présente une étude comparative de plusieurs protocoles qui se divise en 3 groupes : les protocoles pro-actifs, réactifs, hybrides. Cette étude souligne les avantages et les limitations de chaque protocole.

3.3.1 Descriptions de AODV, OLSR et ZRP

Le protocole de routage Ad hoc On demand Distance Vector [9] (AODV), dont les principes sont décrits brièvement dans le *chapitre 1.2.3*, est le protocole réactif le plus populaire. On trouve dans la littérature un grand nombre de recherches utilisant AODV comme élément de référence et de comparaison de résultats de simulations. Ce protocole, si souvent cité et décrié face à la problématique des VANETs, n'en est pas moins présent dans la quasi-totalité des études comparatives. Il fait figure de protocole de référence.

Étant donné les résultats mitigés obtenus avec AODV dans les chapitres précédents (*chapitre 2.3.2*), nous avons également conduit des investigations avec d'autres protocoles de routages topologiques, notamment des protocoles pro-actifs ou hybrides. Ces travaux ont été menés en collaboration avec Tiguiane Yelemou dans le cadre de sa thèse. Les protocoles Optimized Link State Routing (OLSR) [10] et Zone Routing Protocol (ZRP) [11] ont été choisis comme meilleurs représentants de ces deux familles.

Le choix entre un protocole réactif et un pro-actif est un problème récurrent pour les VANETs. La tendance globale incite à aller vers les protocoles réactifs car bon nombre de recherches [12] [13] ont montré que les protocoles pro-actifs ont de moins bons résultats et ce, pour différentes métriques (comme par exemple le taux de paquets reçus ou encore le taux de paquets de routage). Cependant, bien souvent les comparaisons aboutissant à cette conclusion sont issues de résultats de simulations qui ne sont pas réalisées avec des conditions de simulation requises pour le domaine des VANETs.

Par ailleurs, il existe même des résultats contradictoires sur cette question. Les recherches menées par Haerri et al. [8] concluent que le protocole OLSR surpasse AODV pour toutes les métriques importantes (taux de paquets reçus, taux de paquets de routage et temps de transmission) des réseaux à partir du moment où les simulations sont réalisées avec un modèle de mobilité réaliste. La limite de ce travail est que les obstacles ne sont pas pris en compte dans l'environnement de propagation des ondes car les auteurs n'utilisent pas de modèle de propagation réaliste. De plus, comme les auteurs ont réalisé leurs simulations dans

un contexte où le nombre moyen de sauts est de 2 (ce qui n'est pas illogique avec une propagation sans obstacles), il est difficile d'analyser le comportement et les caractéristiques du protocole OLSR, car des chemins à 2 sauts n'exploitent pas entièrement les fonctionnalités de ce protocole.

Finalement, les différentes recherches comparatives menées laissent planer le doute sur la réalité des performances des protocoles pro-actifs par rapport aux protocoles réactifs. Les simulations menées dans cette partie ont pour objectif d'apporter des éléments qui pourront aider à lever ce doute.

AODV

AODV [9] est un protocole réactif à simple chemin. Lorsqu'un nœud source a des données à envoyer à une destination et qu'il ne connaît pas la route vers cette destination, il inonde le réseau avec des messages Route REQuest (RREQ). Ces messages vont être relayés *via* des nœuds intermédiaires jusqu'à la destination, ou *via* un nœud qui dispose déjà d'une route vers la destination. Le nœud destination ou intermédiaire va ensuite répondre à la première requête qu'il reçoit avec un message Route REPLY (RREP). Les requêtes suivantes qui peuvent arriver *via* d'autres nœuds intermédiaires ne seront pas prises en compte. Seule la première réponse est conservée car c'est celle qui a emprunté le chemin le plus rapide. C'est ce mécanisme qui réduit la recherche de route et limite le chemin à la route ayant le délai le plus court.

Un autre mécanisme important dans AODV concerne la connectivité du réseau. Chaque nœud envoie périodiquement des messages *Hello*. Chaque nœud considère qu'une connexion avec un voisin est rompue s'il ne reçoit plus de messages *Hello* d'un voisin connu pendant un temps prédéfini. Dans ce cas, une procédure appelée Local Repair est lancée pour déterminer une nouvelle route jusqu'à la destination. Les paquets de données qui arrivent sont stockés par le nœud qui effectue la procédure, puis ré-acheminés une fois celle-ci aboutie positivement. Finalement, si la procédure est infructueuse, le nœud propage un message Route ERRor (RERR) en *unicast* directement vers la source contenant la liste des destinations inatteignables. Lorsque la source reçoit ce message, elle relance une procédure de découverte de route. C'est un des désavantages de AODV. Le fait qu'une seule route connecte la source et la destination, peut engendrer des temps importants de recherche de route en cas de rupture de lien.

L'ensemble des mécanismes de AODV fonctionne à l'aide de « timers » qui décrivent la réactivité du protocole. On trouve par exemple un *timer* qui correspond à l'intervalle entre deux messages *Hello*, ou encore un *timer* qui correspond à la durée d'attente avant de relancer une recherche de route en cas de rupture de route. Pour chacun des mécanismes de AODV, il existe un ou des *timers* qui donnent une mesure temporelle fixe permettant au protocole de fonctionner. L'ensemble de ces *timers* est explicité et défini dans le RFC3561 [14]. Par exemple, ACTIVE ROUTE TIMEOUT détermine le temps de vie d'une route, c'est-à-dire combien de temps elle va rester active dans la table de routage avant d'être supprimée.

Enfin, le protocole AODV ne prend pas en compte de métrique de qualité de service. Le chemin établi entre la source et la destination est le plus court chemin en nombre de sauts. Pourtant, le chemin le plus court n'est pas toujours le plus sûr par rapport à la qualité et aux performances des liens sans fil, et les paquets de petites tailles, tels que les messages de contrôle, ont plus de chance d'atteindre leur destination que des paquets de grande taille, comme les paquets de données. Tous ces éléments interrogent quant à la fiabilité de AODV, notamment dans un contexte de mobilité tel que les VANETs où la topologie du réseau peut évoluer très rapidement.

OSLR

Le protocole Optimized Link State Routing (OLSR) [10] est un protocole à état de liens. Ce protocole maintient l'état de tous les liens du réseau pour construire le graphe du réseau et calculer le plus court chemin à l'aide d'un algorithme de Dijkstra. OLSR utilise deux types de messages : *Hello* et *Topology Control* (TC). Tout comme dans AODV, les messages *Hello* permettent de découvrir les voisins et de détecter les changements d'état d'un lien. Les messages TC permettent quant à eux de propager une information de changement d'état d'un lien à l'ensemble des nœuds du réseau.

Une des principales caractéristiques du protocole OLSR concerne le passage à l'échelle. Le protocole nécessite d'avoir en permanence une vision de l'ensemble du réseau à jour. Aussi les tables de routage des nœuds doivent contenir énormément d'informations. Dans un grand réseau, cela pose des problèmes de mémoire et de congestion des messages de contrôle. Le protocole OLSR règle le problème du passage à l'échelle avec un mécanisme simple. Chaque nœud sélectionne un ensemble de nœuds appelé *MultiPoint Relays* (MPR). Seuls ces nœuds relaient les messages TC entre eux, limitant ainsi les messages et simplifiant les tables de routage. La sélection des nœuds MPR se fait grâce à un algorithme qui oblige tous les voisins à deux sauts à avoir un lien bidirectionnel avec au moins un nœud MPR.

Ainsi, dans un contexte VANET où la topologie évolue rapidement, il est courant de penser que les algorithmes pro-actifs, comme OLSR, ne sont pas une bonne solution. Mais il existe des résultats contradictoires comme ceux présentés dans [8] par exemple. Pour tenter d'éclaircir la situation quant aux protocoles pro-actifs, nous avons testé OLSR.

ZRP

Zone Routing Protocol (ZRP) [11] est un protocole de routage Ad Hoc hybride qui combine les avantages des protocoles réactifs avec les avantages des protocoles pro-actifs. L'idée est d'utiliser un routage pro-actif à l'intérieur d'une zone délimitée, et d'utiliser un routage réactif au delà de cette zone. Cela signifie que localement le protocole fonctionne de manière réactive, car c'est sur des petites zones que ce type de protocoles est le plus efficace, et que globalement, il optimise son propre fonctionnement de manière pro-active. Pour faire fonctionner cet ensemble, des messages spécifiques sont mis en place en fonction du type de routage. Un intra-zone routing protocol (iarp) est utilisé dans la zone où le routage est pro-actif et un inter-zone routing protocol (ierp) est utilisé au-delà. Iarp peut être n'importe quel protocole pro-actif et Ierp n'importe quel protocole réactif.

La manière dont le protocole ZRP divise les nœuds en catégories de voisins proches et éloignés semble être une bonne solution pour répondre aux contraintes de mobilité des VANETs et à la topologie changeante de ces réseaux. D'après [11], cette méthode permet de réduire de manière drastique les paquets de routage dans le réseau par rapport aux protocoles réactifs et pro-actifs, particulièrement dans les grands réseaux mobiles. En effet, les paquets de routage nécessaires au mécanisme réactif sont limités à de petites régions et les paquets de routage dus aux mécanismes pro-actifs ne concernent qu'un nombre limité de nœuds. Enfin, grâce à son mécanisme réactif combiné aux nœuds MPR, ZRP est capable d'établir des routes à la demande de manière très efficace. Une route se compose ainsi tout d'abord d'un chemin *via* les nœuds MPR (grâce aux mécanismes pro-actifs), puis d'un chemin *via* les nœuds voisins de la destination (grâce aux mécanismes réactifs). Ce côté dynamique prononcé semble adapté aux contraintes des réseaux VANETs.

Pourtant, le protocole ZRP n'est pas aussi populaire que les protocoles AODV ou OLSR, et il existe moins de littérature à son sujet, notamment dans le contexte VANET. Les simulations menées par la suite viennent faire la lumière quant aux performances de ZRP lorsqu'il est confronté aux propriétés dynamiques des VANETs, et utilisé dans un environnement réaliste.

3.3.2 Performances de AODV, OLSR et ZRP dans un environnement réaliste

Il existe de nombreuses études de performances comparatives entre les différents types de protocoles topologiques pour les VANETs. Cependant, il n'existe pas à notre connaissance d'étude qui prenne en compte tous les éléments essentiels à la simulation des VANETs comme nous les avons définis dans la section précédente. Cette partie fournit une étude comparative réalisée avec la plate-forme de simulation VANET présentée dans le *chapitre 2*.

Les paramètres des simulation sont ceux explicités dans le *tableau 3.1*. Pour mémoire, les simulations se déroulent dans un environnement urbain et elles mettent en œuvre dix communications entre des nœuds, dont les positions initiales sont choisies aléatoirement et dont les déplacements varient. Les résultats moyens sur l'ensemble des 30 configurations de simulations sont tout d'abord présentés pour les métriques de:

- Taux de paquets reçus,
- Taux de paquets de routage,
- Délai de transmission de bout en bout.

Performances globales

Les figures 3.2 et 3.3 présentées ci-après montrent les performances moyennes des protocoles AODV, OLSR et ZRP.

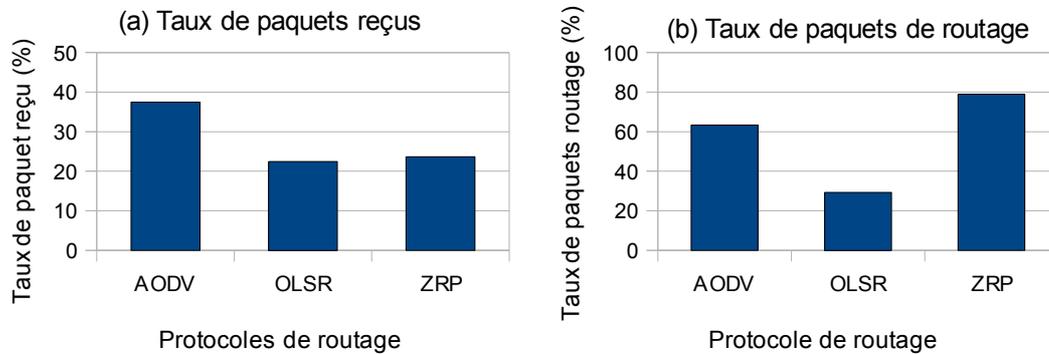


Figure 3.2 : Taux moyen de paquets reçus (a) et Taux moyen de paquets de routage (b) en fonction du protocole de routage.

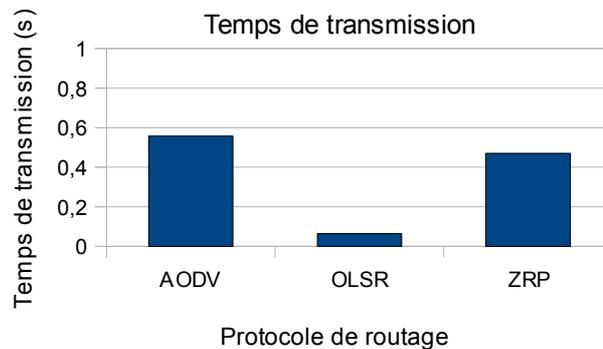


Figure 3.3 : Temps moyen de transmission en fonction du protocole de routage.

La figure 3.2 montre des résultats explicites. Si on regarde le taux de paquets reçus, on constate qu'avec 37% de paquets reçus, le taux obtenu avec le protocole réactif AODV est plus élevé que ceux des protocoles pro-actifs ou hybrides (respectivement 22% et 24% de paquets reçus). En revanche, c'est le protocole pro-actif qui nécessite le taux de paquets de routage le plus faible par rapport à ses concurrents avec seulement 29% de paquets dédiés au routage³ contre 63% et 79% pour respectivement le protocole réactif et le protocole hybride.

Concernant le délai de bout en bout des paquets de données, la figure 3.3 montre que le protocole OLSR est également le plus efficace en terme de temps de transmission par rapport à AODV et ZRP. La différence en temps de transmission est très importante entre OLSR et les deux autres protocoles. Là où les protocoles réactifs et hybrides affichent des temps de transmission moyens de 0,56s et 0,47s, pour un nombre moyen de sauts de respectivement 2,8 et 2, le protocole pro-actif ne nécessite en moyenne que 0,06s de temps de transmission, avec un nombre moyen de sauts de 1,9.

On constate que quel que soit le protocole de routage choisi, le taux de paquets reçus ne dépasse jamais 40%. Il semble inutile de vouloir transmettre rapidement des informations

³ Comme dans les simulations le nombre de paquets de données est identique, alors nous pouvons comparer les taux de paquets de routage.

si seuls 2 paquets sur 5 arrivent à destination. De même, réduire le taux de paquets de routage n'est pas important si cela dégrade encore le taux de paquets reçus. Ces résultats montrent que le canal de propagation VANET simulé entraîne des pertes de paquets bien supérieures à la plupart des estimations et hypothèses classiques.

En effet, les résultats de AODV présentés dans [6] montrent un taux de paquets reçus de 60% avec des paramètres de simulations de 50 nœuds pour 30 communications simultanées avec une vitesse variable jusqu'à 15m/s. Dans [7], les conditions de simulations sont très simples (10 nœuds avec 3 communications simultanées et une vitesse fixe de 4m/s) et on trouve un taux de paquets reçus de plus de 80%. Les travaux de la référence [15] montrent quant à eux un taux de paquets reçus de 65% pour des conditions de simulation similaires à ceux de cette thèse. Dans la référence [12], la vitesse des nœuds va jusqu'à un maximum de 20m/s et pourtant les résultats de AODV sont de 100% pour des conditions quasi-similaires. Un dernier exemple intéressant est la référence [8] qui explique l'intérêt d'un modèle de mobilité mais les résultats présentés montrent néanmoins des taux de paquets reçus supérieurs à 90% avec AODV et avec des variations de plus ou moins 10% selon les modèles de mobilité utilisés. Chacune des ces recherches ayant des lacunes d'un point de vue de la mobilité ou de la couche physique, les résultats présentés dans cette thèse sont bien plus pessimistes que tous ceux évoqués dans ces articles. Néanmoins, cela illustre une fois encore la nécessité de réaliser des simulations VANETs réalistes sous peine d'obtenir des résultats optimistes, voir erronées.

Ainsi, aucun des protocoles étudiés ici ne peut répondre aux besoins des VANETs en terme de performances si on considère que les trois métriques prises en compte ici doivent être optimales simultanément. Les résultats obtenus avec les protocoles AODV, OLSR et ZRP sont très insuffisants, et ne permettent pas des communications dans de bonnes conditions. Le protocole réactif AODV est celui qui offre le meilleur taux de paquets reçus, mais celui-ci reste très faible.

Pour améliorer les performances des protocoles, il faut tout d'abord comprendre ce qui pose problème au niveau du routage dans les simulations VANETs.

Résultats détaillés

Pour analyser les performances du routage dans ces simulations VANETs, nous nous intéressons à une simulation en particulier dont les résultats sont détaillés. Parmi l'ensemble des résultats présentés sur la *figure 3.4*, nous avons choisi la simulation numéro 16 car elle est un exemple représentatif des résultats moyens détaillés *figure 3.2a*. Le protocole de routage AODV donne les meilleurs résultats et les mécanismes de routage des protocoles OLSR et ZRP ne parviennent pas à donner les mêmes résultats.

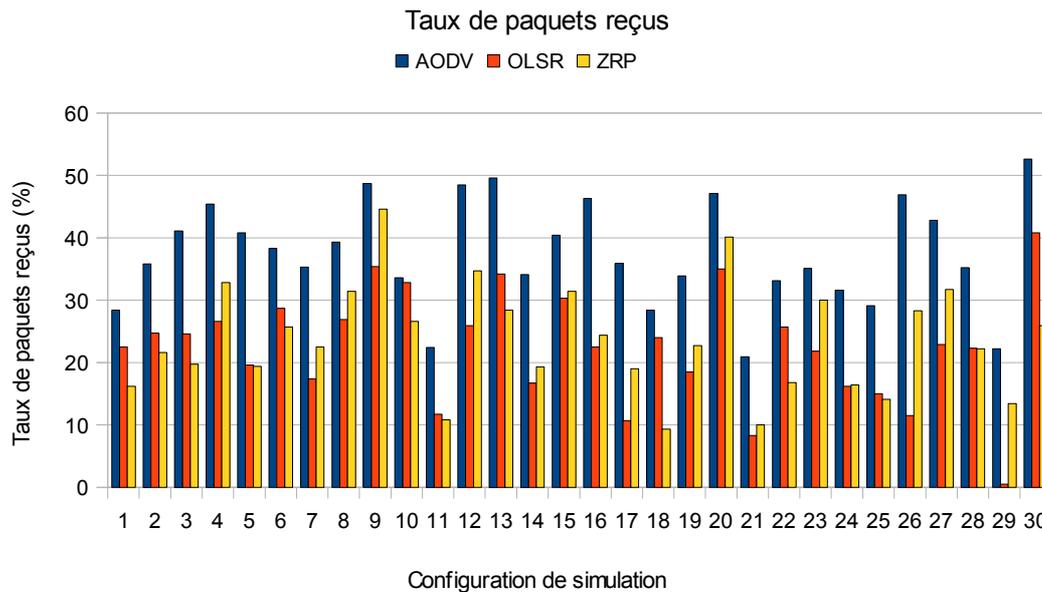


Figure 3.4 : Taux de paquets reçus par configuration de simulation en fonction du protocole de routage.

On peut voir sur la *figure 3.4* que le taux de paquets reçus obtenu avec AODV est toujours supérieur au taux de paquets reçus obtenu avec OLSR ou ZRP. La différence de taux de paquets reçus entre AODV et OLSR peut aller jusqu'à 35% dans le cas de la configuration de simulation 26 par exemple. La différence de taux de paquets reçus entre AODV et ZRP peut aller jusqu'à 26% dans le cas de la configuration de simulation 30 par exemple. La section suivante donne une explication de ces différences importantes.

Un point intéressant à analyser pour expliquer cette différence de taux de paquets reçus est le nombre de ruptures de routes. En effet, la dynamique de la topologie entraîne de nombreuses ruptures de route, et c'est précisément ces ruptures que le protocole doit gérer. La *figure 3.5* présente le nombre de ruptures de route par communication, ainsi que la quantité de routes découvertes pour chacun des protocoles.

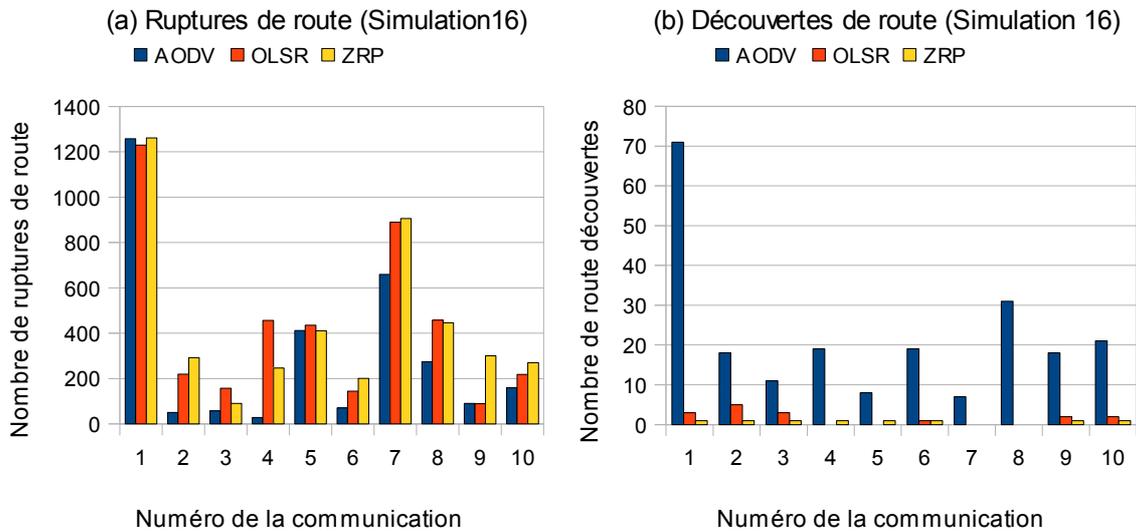


Figure 3.5 : Nombre de ruptures de route (a) et nombre de découvertes de route (b) pour chaque protocole.

Le nombre de ruptures de route correspond aux messages d'erreurs émis par les protocoles, et le nombre de découvertes de route correspond au nombre de fois où le mécanisme de recherche de route est utilisé avec succès. Ainsi, le nombre de ruptures de route englobe à la fois les messages d'erreurs qui sont dus aux ruptures de route et aux ruptures de lien. On constate que le nombre de ruptures de route est, au total, approximativement le même pour chacun des protocoles. Les protocoles de routages testés ne peuvent pas éviter les ruptures de route dues aux changements de topologie du réseau. Selon le protocole de routage, des routes plus ou moins robustes sont trouvées, mais aucune des 10 communications ne s'effectue sans rupture de route pour aucun des protocoles. De plus, on constate que dans toutes les communications sauf la première, c'est AODV qui trouve les routes les plus robustes (les routes qui subissent le moins de ruptures).

Les résultats de la *figure 3.5* sont obtenus avec la même mobilité pour chaque protocole. On constate que, bien que le nombre des ruptures de route soit approximativement le même au total, il existe des différences entre protocoles pour chaque communication. Cela s'explique par la diversité des algorithmes de routage d'un protocole à l'autre, créant ainsi des chemins différents pour chaque communication. Ces ruptures de route dépendent donc de chacun de ces chemins non-corrélés entre eux.

On constate sur la *figure 3.5b* que la différence majeure entre les protocoles présentés concerne les découvertes de route. Les résultats obtenus par les protocoles pro-actifs et hybrides sont proches de zéro. Le protocole OLSR trouve au mieux 5 routes pour une communication et le protocole ZRP une seule. Dès lors qu'une rupture de route survient dans le réseau, ces deux protocoles peinent à retrouver une route pour atteindre la destination. Leurs mécanismes basés sur une connaissance complète de la topologie du réseau pour acheminer les paquets montre ici ses limites. Cependant, quand il est face à des liens changeants, le protocole AODV trouve une plus grande quantité de routes alternatives (entre 5 et 70 selon la communication). AODV est donc bien plus adapté pour faire face à de nombreuses ruptures de route. La *figure 3.6* permet d'illustrer ce phénomène sur la communication spécifique numéro trois.



Figure 3.6 : L'environnement de simulation urbain de la ville de Munich avec 60 véhicules.

La *figure 3.6* représente l'environnement de simulation urbain de la ville de Munich avec 60 véhicules. La position des nœuds et leurs déplacements correspond à la configuration de simulation numéro 16. Les bâtiments sont représentés en rouge et les points noirs représentent les véhicules. Chaque véhicule est mobile et cette figure est une photo à un instant donné de la simulation (après 10 secondes de simulation). On s'intéresse ici particulièrement à la communication entre les nœuds 3 et 1. Les nœuds 1 et 3 bougent dans des directions opposées à partir de l'instant $t = 10s$, (*cf. figure 3.6*). Ainsi au cours de la simulation, le chemin le plus court qui permet de relier ces deux nœuds se fait *via* le nœud 5 (3->5->1), puis directement (3->1), puis à nouveau *via* le nœud 5 (3->5->1).

Le protocole de routage AODV utilise ces 3 chemins les uns après les autres en fonction de l'évolution de la topologie. Il y a 58 ruptures de routes pour cette communication en utilisant AODV, et le protocole trouve 11 fois le moyen de relier la destination. La route 3->5->1 est trouvée 3 fois, puis la route 3->1 est trouvée 2 fois, puis à nouveau la route 3->5->1 est trouvée 6 fois. Si on compare avec OLSR, le protocole pro-actif trouve 1 fois la route 3->5->1 puis 2 fois la route 3->1. Le mécanisme de routage, nécessitant une connaissance des voisins pour établir la route, ne permet pas de relier la destination lors de mouvements importants comme c'est le cas pour les nœuds 3 et 1 dans cette configuration de simulation. Le protocole ZRP ne trouve quant à lui qu'une seule route, 3->5->1, et dès la première rupture de route, il ne retrouve plus jamais de chemin pour relier la destination.

Ces routes ont une durée très variable. Les 11 routes découvertes par le protocole AODV ont une durée avant rupture de respectivement : 1,59s ; 1,07s ; 1,2s ; 0,26s ; 0,47s ; 2,15s ; 1,69s ; 1,45s ; 1,79s ; 2,46s et 0,86, soit une durée moyenne de 1,36s. Pour les 3 routes découvertes par le protocole OLSR, on trouve des durées de respectivement : 0,04s ; 0,02s et 0,06s soit une durée moyenne de 0,04s. La route de ZRP a une durée de 0,22s.

Les simulations ont été effectuées avec 60 nœuds, mais on peut légitimement penser que si on augmente le nombre de nœuds, l'écart de découvertes de route entre les protocoles va encore s'amplifier. Avec plus de nœuds, établir la topologie complète sera encore plus compliqué, et donc les protocoles pro-actifs et hybrides devraient avoir encore plus de difficultés à constituer une topologie complète du réseau sur lequel ils appliqueront leur algorithme de routage. En revanche, pour le protocole réactif, plus de nœuds signifie plus de routes possibles entre l'émetteur et le récepteur, augmentant ainsi les possibilités de routes alternatives en cas de rupture de route.

Concernant le temps moyen de recherche de route (*cf. figure 3.7*), les protocoles AODV et OLSR affichent des temps bien inférieurs à ceux de ZRP. Il faut en moyenne 2,2s au protocole hybride pour établir une route, là où les protocoles pro-actifs et réactifs mettent en moyenne 0,52s et 0,63s.

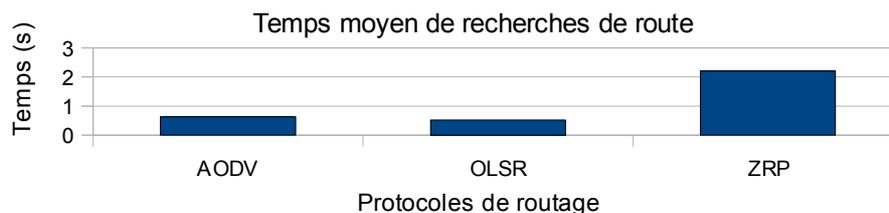


Figure 3.7 : Temps moyen de recherches de route.

Cette dernière observation vient confirmer les résultats de découvertes de route (*cf. figure 3.5b*). Du fait de leur nécessité de connaissance globale du réseau, les protocoles OLSR et ZRP ne gèrent pas correctement les ruptures de route générées par les mouvements rapides des véhicules. On peut cependant noter que le protocole OLSR obtient des résultats corrects lorsque les nœuds sont à l'arrêt. Par exemple, dans le cas de la communication entre les nœuds 3 et 10 (communication numéro deux) pour la configuration de simulation 16, les nœuds sont à l'arrêt entre les instants $t = 25s$ et $t = 32s$ (à cause des feux de croisement). Durant cette période, le protocole OLSR trouve rapidement des routes pour relier les deux nœuds, même après plusieurs ruptures de route.

Conclusions

Les protocoles topologiques AODV, OLSR et ZRP ont été testés dans des conditions réalistes. Parmi ces différentes familles de protocoles, les résultats ont montré que les protocoles réactifs apportent une meilleure réponse à la problématique VANET de par leur gestion des ruptures de routes. En effet, le taux de paquets reçus du protocole réactif AODV est meilleur de 15% par rapport aux protocoles pro-actif et hybride testés, la différence est significative. Le comparatif du nombre de découvertes de route par protocole est venu apporter l'explication à cet écart de taux de paquets reçus important, car c'est le protocole réactif qui a trouvé le plus grand nombre de routes. C'est pour cette raison que cette famille de protocoles est privilégiée par rapport aux autres.

On notera néanmoins que les résultats de simulation VANET présentés dans cette partie sont certes meilleurs avec AODV qu'avec les autres protocoles, mais que ces résultats sont loin d'être satisfaisants en terme de taux de paquets remis. Le choix d'un protocole de routage tel que AODV, même s'il se positionne comme la meilleure alternative, ne permet pas de réaliser des communications en contexte VANET réaliste de manière efficace. Le taux de réception des paquets reste inférieur à 50%. Il faut donc s'orienter vers d'autres propositions, que ce soient des optimisations du protocole AODV, ou des nouveaux protocoles de routage réactifs.

Dans le but d'obtenir les meilleures performances possibles pour les VANETs, et suite à cette étude comparative entre des protocoles réactifs, pro-actifs et hybrides, notre choix de protocole de routage s'oriente vers les protocoles réactifs.

3.4 Évaluation de protocoles réactifs

Même si, comme nous venons de le voir, les protocoles réactifs tels que AODV surpassent les protocoles hybrides et pro-actifs, l'approche de routage réactive n'est pas sans poser de problèmes. Puisque les routes sont recherchées uniquement à la demande, l'étape de découvertes de route s'additionne aux temps de transmission et augmente le délai de remise de bout en bout. Si cette phase de découverte dure trop longtemps, alors le stockage des paquets de données durant le processus de découverte de route peut créer des pertes de paquets dues à un dépassement de capacité de stockage. C'est pour cette raison qu'il existe de nombreux travaux proposant des algorithmes dérivés du standard AODV. Par exemple, le protocole V-AODV proposé par [7] améliore le délai de transmission ou le taux de paquets reçus. La méthode proposée est de fixer un délai maximum autorisé entre l'émetteur et le récepteur, et de bloquer les paquets de routage si jamais ce délai est franchi. L'autre métrique utilisée dans [7] est le taux d'erreur binaire; et là encore, la proposition consiste à fixer un seuil maximum autorisé. Avec cette méthode, on trouve moins souvent des routes, mais celles-ci sont de meilleures qualités. Les auteurs de [15] ont, quant à eux, proposé DFIA-AODV, un protocole de routage basé sur la connaissance des interférences. Là encore, l'objectif est d'améliorer la qualité de service. L'idée de cette proposition est d'utiliser plusieurs canaux, couplés à une métrique qui maximise le SNR (Signal to Noise Ratio) pour améliorer les performances. Dans chacune de ces propositions ([7] et [15]), les auteurs obtiennent de meilleurs résultats, avec leurs protocoles respectifs, qu'avec le protocole AODV.

Comme nous l'avons vu, quand le protocole réactif AODV est confronté à des situations réalistes, il perd en performances. Ainsi, deux améliorations disposant de mécanismes de routage pouvant répondre aux changements topologiques ont été proposées. Ce sont les protocoles Ad Hoc On-demand Multi path Distance Vector (AOMDV) [16] et DYnamic MANET On-demand (DYMO) [17]. Chacun d'eux est basé sur le protocole réactif standard, en y intégrant respectivement, un mécanisme multi-chemin permettant de répondre à plusieurs requêtes de route, et un mécanisme de réparation utilisant la route complète. Ces deux protocoles ont tous deux suscité l'intérêt de la communauté scientifique dans différents domaines, et notamment celui des VANETs.

Les auteurs de AOMDV et DYMO montrent que les performances de ces protocoles sont significativement améliorées par rapport à AODV. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas de comparaison entre les différentes optimisations de AODV qui aient été réalisées avec une plate-forme de simulation dédiée VANET. Ces travaux de thèse se proposent de le faire.

3.4.1 Description de AOMDV et DYMO

Parmi les propositions d'algorithmes de routage réactifs existants, notre choix s'est orienté vers les deux protocoles: AOMDV et DYMO. Ils sont décrits dans cette section.

AOMDV

L'une des contributions majeures pour améliorer AODV a été d'implémenter le multi-chemin dans la découverte de route. C'est-à-dire que l'émetteur et le récepteur ne se contentent pas de réponses uniquement au premier message de requête (RREQ) et message de réponse (RREP), mais ils répondent aussi aux messages qui arrivent après. Si les routes arrivées plus tard nécessitent moins de sauts alors elles seront privilégiées. Ce mécanisme présente un intérêt dans un contexte de mobilité. En effet, les requêtes qui arrivent plus tard peuvent créer des chemins plus courts que les routes initiales si la topologie a évolué entre temps. En revanche, comme chaque découverte de route induit des délais supplémentaires et donc une latence de remise de paquets due à la recherche de route, la fréquence de découverte de route doit rester aussi faible que possible pour que le protocole soit efficace.

On-demand Multi path Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks (AOMDV) présenté dans [16] utilise ce mécanisme. Les premiers travaux sur AOMDV ont été réalisés pour des environnements statiques. Depuis, tout comme AODV avant lui, de nombreux travaux se sont intéressés à ce protocole pour essayer de l'optimiser.

Le protocole AOMDV emploie aussi les techniques de « Multiple Loop-Free » et « Link-Disjoint path », c'est-à-dire des techniques permettant d'éviter les boucles dans la recherche de route. Par exemple, l'utilisation de numéros de séquence permet de contrer ce phénomène. En effet, des boucles de routage peuvent se produire si la convergence lente d'un réseau avec une nouvelle configuration entraîne des entrées de routage incohérentes. Les paquets tournent alors sans cesse en boucle.

Le mécanisme de découverte de route est similaire à AODV avec l'utilisation de message RREQ pour établir un chemin jusqu'à la destination en passant par des nœuds intermédiaires. Pour éviter les boucles infinies, un compteur est inséré dans les messages de découvertes formant ainsi une séquence numérotée jusqu'à la destination. De manière simple, à chaque nouveau saut à la destination, le compteur est incrémenté. La différence principale avec AODV est que le mécanisme ne s'arrête pas lorsque la première route valide est trouvée. Une destination qui reçoit un message RREQ après le premier, va comparer celui-ci en terme de compteur. En effet, bien que le premier chemin est celui qui est le plus court en terme de délai, du fait de la variabilité des liens physiques, le ou les chemins suivants peuvent avoir un nombre de sauts vers la destination plus petit ou égal à celui découvert grâce au premier message RREQ reçu. En empruntant des chemins qui n'utilisent pas les mêmes nœuds intermédiaires, des ruptures de route peuvent être évitées et la qualité de service améliorée. C'est ce mécanisme de « Link-Disjoint path » [8] qui est utilisé par AOMDV. Ce mécanisme permet de s'assurer que chacune des routes existantes sera bel et bien empruntée, et de choisir finalement la meilleure en terme de nombre de sauts. AOMDV considère que les RREQ entre deux nœuds sont disjoints si leur premier saut est disjoint. Ainsi, cette information de premier saut est incluse dans un champ supplémentaire des paquets RREQ.

L'algorithme de multi-chemin est très intéressant dans le contexte VANET où la topologie du réseau change rapidement, créant ainsi une grande quantité de chemins possibles entre l'émetteur et le récepteur. Ce protocole a suscité l'intérêt de bon nombre de chercheurs du domaine à tel point que, tout comme son prédécesseur AODV, plusieurs améliorations et optimisations du protocole existent. Les simulations de AOMDV présentées ci-après ont été effectuées avec les paramètres standards du protocole tels qu'ils sont décrits dans le simulateur NS-2 pour analyser l'impact du multi-chemin dans les VANETs.

DYMO

DYMO [17] est un protocole de routage réactif basé sur AODV et datant de 2009. Le mécanisme de découverte de route et les messages de contrôle restent les mêmes. La différence essentielle entre DYMO et son prédécesseur vient du chemin de routage. Là, où AODV ne garde en mémoire que la destination et le prochain saut vers la destination, le protocole DYMO garde l'information de tous les nœuds intermédiaires du chemin nouvellement découvert. L'émetteur ainsi que les nœuds servant de relais connaissent la liste de tous les nœuds intermédiaires.

DYMO semble tout à fait adapté au contexte des VANETs. En effet ses auteurs le présentent et le testent dans la référence [17] en l'utilisant dans un contexte VANETs. Ayant accès à tout moment au chemin complet, le protocole peut plus facilement répondre aux messages d'erreurs diffusés en cas de rupture de route, et trouver un chemin alternatif depuis n'importe lequel des nœuds intermédiaires sans relancer de recherche de route depuis l'émetteur. Les auteurs de [17] montrent une amélioration des performances de DYMO par rapport à AODV en contexte VANETs, mais la plate-forme de simulation considérée dans [17] possède des lacunes notamment au niveau de la couche physique. Les simulations effectuées ont pour objectif de valider ou non ces améliorations de performances. Les simulations du protocole DYMO réalisées dans cette thèse ont été effectuées avec la version de DYMO disponible pour NS-2 v34 [18].

3.4.2 Performances de AODV, AOMDV et DYMO dans un environnement réaliste

Il existe plusieurs études qui évaluent des améliorations du protocole AODV. En revanche, la plupart du temps ces optimisations sont comparées au protocole de base, mais les améliorations sont rarement comparées entre elles, et encore plus rarement dans un contexte VANET réaliste.

Les paramètres des simulations sont ceux explicités dans le *tableau 3.1*. Nous allons d'abord comparer ces deux protocoles avec AODV, sur la base de résultats moyens de 30 simulations, en fonction des trois critères de taux de paquets reçus, taux de paquets de routage et délai de transmission. Puis une analyse détaillée permettant une comparaison fine entre les protocoles est proposée.

Performances globales

Les figures 3.8 et 3.9 présentées ci-après montrent les performances moyennes des protocoles AODV, DYMO et AOMDV.

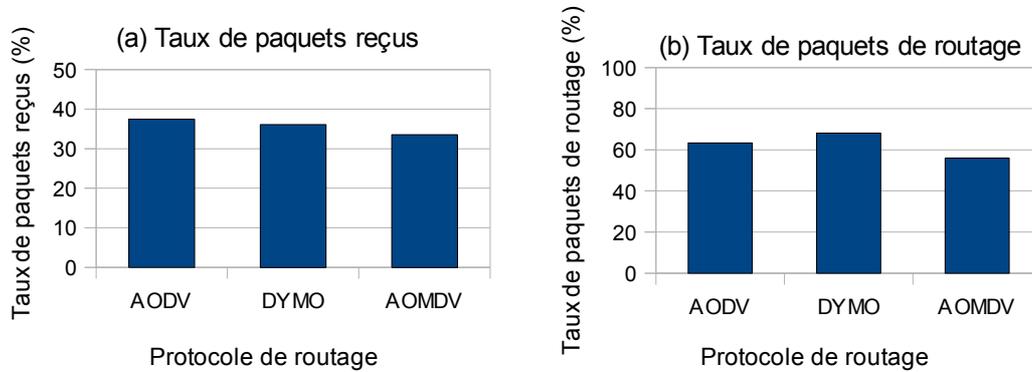


Figure 3.8 : Taux moyen de paquets reçus (a) et Taux moyen de paquets de routage (b) en fonction du protocole de routage.

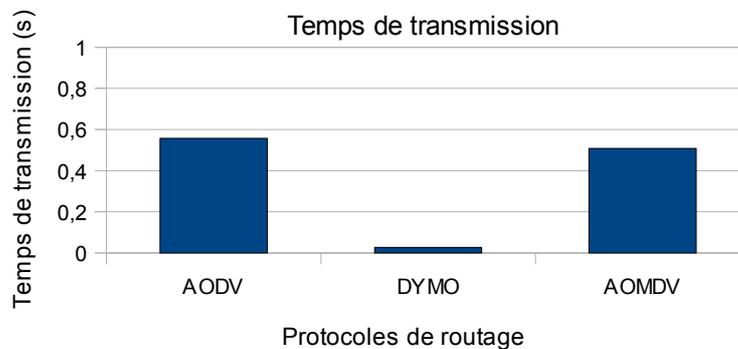


Figure 3.9 : Temps moyen de transmission en fonction du protocole de routage.

Les résultats de simulation présentés en figure 3.8a sont quasi-identiques pour les trois protocoles évalués. Aucun des protocoles ne donne de meilleur résultat que le standard AODV en terme de taux de paquets reçus. Alors que les simulations effectuées avec AODV donnent un taux de paquets reçus de 37%, le protocole DYMO régresse de 1% et le protocole AOMDV de 3,5%. Finalement, ces deux algorithmes restent dans la lignée de leur prédécesseur et n'optimisent pas ce critère. Concernant le taux de paquets de routage, on voit sur la figure 3.6b que AOMDV présente une légère amélioration. Le taux de paquets de routage de AOMDV est de 56% au lieu des 63% de AODV. En revanche DYMO offre des performances moins intéressantes que son prédécesseur pour cette métrique également (avec 68% de paquets de routage). Les deux protocoles testés sont donc à plus ou moins 5% de la référence.

La figure 3.9 présente, contrairement au deux précédentes métriques, des résultats tout à fait intéressants, notamment concernant le protocole DYMO. En effet, alors qu'il n'y a pas non plus ni amélioration ni dégradation significative concernant le taux de paquets reçus et le taux de paquets de routage, l'optimisation apportée par DYMO au niveau du temps de transmission moyen est flagrante. Le temps de transmission moyen de AODV est de 0,56s, et l'amélioration apportée par DYMO permet de réduire ce temps à seulement 0,03s. Le protocole AOMDV réduit également un peu le temps de transmission moyen à 0,51s.

Finalement, l'optimisation de AOMDV se matérialise sur les performances par un gain de taux de paquets de routage et un gain en temps de transmission. Ces gains sont toutefois faibles et contrebalancés par une perte de taux de paquets reçus. Concernant le protocole DYMO, les pertes de paquets sont faibles (de l'ordre de 5%) alors que l'apport de performance en temps de transmission est quasiment d'une demi-seconde.

Le gain de temps de transmission s'explique généralement par l'utilisation de routes plus courtes en nombre de sauts. La *figure 3.10* vient nuancer cette hypothèse :

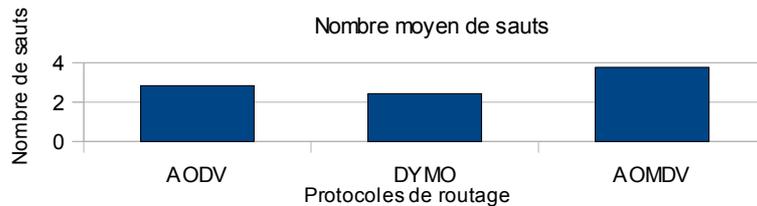


Figure 3.10 : Nombre moyen de sauts en fonction du protocole de routage.

La *figure 3.10* montre le nombre moyen de sauts nécessaires pour atteindre la destination pour chaque protocole. On constate que le protocole DYMO a certes un nombre moyen de sauts inférieur aux autres protocoles, mais cela ne suffit pas pour expliquer ses performances en terme de temps de transmission. On constate également que le multi-chemin impose à AOMDV d'emprunter des routes différentes et plus longues que celles des autres protocoles, alors même que son objectif est de minimiser le nombre de sauts. Finalement, la *figure 3.10* montre que les résultats entre le nombre de sauts et le temps de transmission ne sont pas toujours corrélés. L'explication du gain de temps de transmission de DYMO est donnée ultérieurement.

Résultats détaillés

Pour étudier les résultats des trois protocoles, on cherche une simulation particulière qui donne des résultats identiques aux résultats moyens. L'ensemble des résultats, au cas par cas, est présenté sur la *figure 3.11*. La configuration de simulation 15 est une configuration qui correspond ici aux résultats moyens (*cf figure 3.8a*) : AODV donne le meilleur taux de paquets de routage, suivi par DYMO et AOMDV. Elle sera donc l'objet d'une étude plus approfondie concernant le routage.

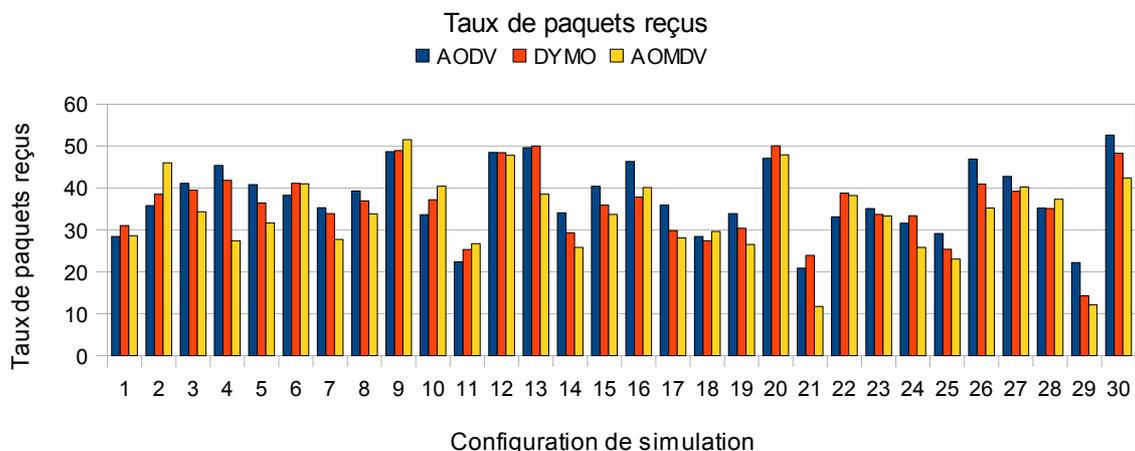


Figure 3.11 : Taux de paquets reçus par configuration de simulation en fonction du protocole de routage.

La *figure 3.12* présente le nombre de ruptures de route par communication, ainsi que la quantité de routes découvertes pour chacun des protocoles. A nouveau dans cette partie, les communications émetteur/récepteur sont numérotées de 1 à 10 (*cf tableau 3.2* partie 3.2.1). Du point de vue des ruptures de routes, tous les protocoles réactifs restent cohérents au niveau des résultats. L'enjeu est donc plutôt du côté des mécanismes de réparation des routes brisées. On constate que, pour chaque communication, chaque protocole trouve plus ou moins de routes en fonction de son algorithme de routage.

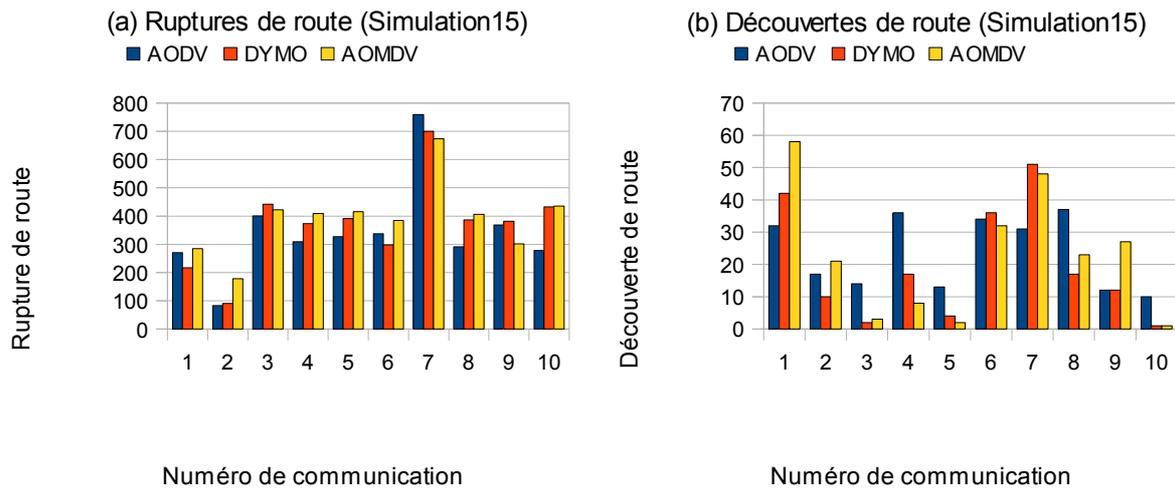


Figure 3.12 : Nombre de ruptures de route (a) et nombre de découvertes de route (b) pour chaque protocole.

Pour le cas du protocole AOMDV, le choix de chemins multiples s'avère parfois très intéressant comme dans le cas de la communication 1. La *figure 3.12a* permet de voir que AOMDV a moins de 300 ruptures de route pour cette communication, pour plus de 50 routes trouvées (*cf figure 3.12b*). Dans ce cas de figure, le choix du multi-chemin s'avère pertinent. En revanche si on regarde la communication numéro 10, on constate que AOMDV subit plus de 400 ruptures de route pour seulement une route trouvée. En comparaison, AODV est capable de fournir 10 routes pour la même communication. L'intérêt de AOMDV est de pouvoir utiliser plusieurs routes différentes. Les routes alternatives ne sont pas choisies sur des critères de QoS, donc parfois la route alternative sélectionnée permet de meilleures performances et parfois non. En fait, si le nombre de sauts est plus petit, la route est choisie, même si elle est moins robuste. Ainsi, il faut regarder l'ensemble des communications pour voir l'impact positif ou non du multi-chemin.

Pour le cas du protocole DYMO, on observe les mêmes résultats quant à l'optimisation du protocole, que pour AOMDV. La mémoire dédiée au trajet global de chaque communication, et la technique qui exploite ces informations, ne semblent pas être des solutions. Dans certains cas de figure, comme celui de la communication 7 (*cf. figure 3.12b*) le protocole DYMO permet de trouver un grand nombre de routes. Mais dans d'autres cas, tel que celui de la communication 10, les performances de DYMO restent inférieures à celles du protocole AODV.

On remarque également que, quel que soit le protocole réactif, on trouve toujours au moins une route pour rejoindre la destination. Cette remarque est valable pour l'ensemble des 30 simulations, et elle valide notre choix des protocoles réactifs par rapport aux autres.

L'amélioration des performances de AOMDV et DYMO ne semble pas directement liée au nombre de routes découvertes. Si on se penche sur le délai moyen d'établissement de routes, comme le montre la *figure 3.13*, on constate que DYMO apporte un gain significatif de délai moyen d'établissement d'une route.

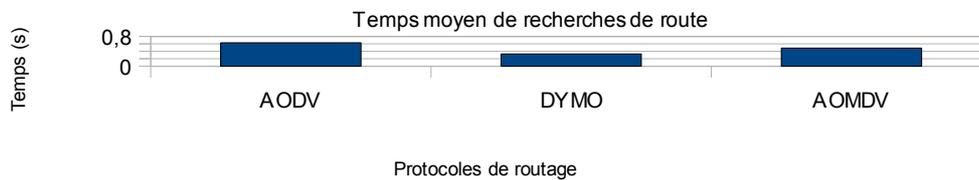


Figure 3.13 : Temps moyen de recherches de route.

En effet, alors que le délai moyen de recherche de route de AODV est de 0,63s, celui de DYMO est divisé par deux avec 0,33s. Ceci est dû à la mémoire présente dans le protocole DYMO qui permet de conserver le chemin complet vers la destination, de recalculer uniquement la fin d'une route en cas d'erreur, évitant ainsi de relancer toute la procédure. Pour AOMDV, on voit que le multi-chemin apporte aussi, en moyenne, un gain de temps dans la recherche de route. C'est cet élément qui explique l'optimisation en gain de temps de transmission de AOMDV et DYMO visualisé sur la *figure 3.9*.

Finalement, dans nos simulations VANETs, l'utilisation du multi-chemin permet au protocole AOMDV de réduire le temps de transmission ainsi que le taux de paquets de routage. En revanche, le fait de choisir un chemin alternatif dès que l'occasion s'en présente, détériore le taux de paquets reçus. Concernant le protocole DYMO, la mémoire des chemins permet une amélioration de la réactivité lors des ruptures de route ce qui améliore grandement le délai de transmission.

Synthèses et conclusions

Les résultats des *figures 3.8 et 3.9* montrent que l'utilisation du protocole de routage AOMDV améliore le taux de paquets de routage et le temps de transmission par rapport au protocole AODV. Le taux de paquets reçus est dégradé mais reste dans un ordre de grandeur équivalent. L'utilisation de routes différentes par le protocole AOMDV lui permet de trouver des chemins que le protocole AODV ne prend pas en compte, du fait de leur arrivée postérieure à la première réponse, la plus rapide. En revanche, rien ne permet de garantir que ces chemins soient meilleurs, car la métrique utilisée est le nombre de sauts et il n'y a pas de critère de qualité de service permettant de choisir un chemin plutôt qu'un autre.

Les résultats détaillés (*cf. figure 3.11*) montrent que les chemins utilisés par le protocole AOMDV offrent tantôt un meilleur taux de paquets reçus, tantôt un taux de paquets reçus dégradé. Ces résultats montrent que sans critère de sélection autre que le nombre de sauts, le protocole n'optimise pas de manière efficace la découverte de chemins alternatifs dans le contexte VANET.

Contrairement aux résultats espérés selon la référence [16], c'est-à-dire plus de 85% de paquets reçus avec AOMDV, les résultats que nous avons trouvés ne sont pas satisfaisants pour permettre des communications VANETs dans de bonnes conditions. En effet, l'amélioration des résultats en terme de temps de transmission et de paquets de routage est faible. Le gain moyen en terme de temps de transmission n'est que de 0,05s et la réduction des

paquets de routage s'élève à seulement 7% des paquets, avec une perte en terme de taux de paquets reçus de 3,5 %. On ne peut donc pas conclure que AOMDV apporte une amélioration significative.

L'apport de AOMDV reste donc limité et l'impact de l'utilisation d'un simulateur VANET réaliste est une fois de plus illustré car les résultats obtenus sont bien inférieurs à ceux obtenus dans des conditions telles que celles de l'espace libre [16].

Concernant le protocole DYMO, nous avons vu que l'amélioration des performances en temps de transmission est significative. L'utilisation du protocole DYMO réduit d'une demi-seconde le temps moyen nécessaire pour une communication (*cf. figure 3.9*), et la dégradation sur les métriques de taux de paquets reçus et taux de paquets de routage reste limitée (respectivement 1% et 5%).

Les bonnes performances de DYMO en terme de temps de transmission sont très satisfaisantes. En effet, bien que la référence [19] montre que DYMO se comporte moins bien que AODV pour des vitesses supérieures à 8m/s, les diminutions de performances en terme de taux de paquets de routage et de taux de paquets reçus qui se retrouvent dans nos simulations, sont moindres en comparaison du gain en temps de transmission. Si la métrique privilégiée est uniquement le temps de transmission, alors le protocole DYMO est une alternative intéressante à AODV.

Finalement, le taux de paquets reçus des protocoles AOMDV et DYMO n'est pas meilleur que celui de AODV, et les VANETs nécessitent avant tout un taux de paquets reçus élevé pour pouvoir communiquer. Ainsi, parmi les protocoles réactifs testés, aucun ne se détache réellement des autres pour les communications VANETs. Les protocoles testés jusqu'à maintenant l'ont été dans leur forme standard. Ils n'incluaient pas de métrique de qualité de service et se basaient uniquement sur le nombre de sauts vers la destination pour discriminer les routes découvertes.

3.5 Adaptation de AODV au contexte VANET

Dans les sections précédentes, nous avons vu que la famille des protocoles de routage réactifs donne les meilleurs résultats lors de simulations dans le contexte des VANETs. Puis parmi les protocoles réactifs testés, c'est le protocole AODV qui a montré les meilleurs résultats en terme de taux de paquets reçus, critère qui nous apparaît comme essentiel pour une bonne communication. Les protocoles testés dans les précédentes parties ont été utilisés dans leurs versions standards. Ils n'intègrent pas de métrique autre que le nombre de sauts dans leur algorithme de routage. Ils ne disposent pas de mécanisme de sélection de route basé sur un critère de qualité de service.

Les résultats de la partie précédente ont mis en évidence que les mécanismes des protocoles de routage standards testés en conditions réalistes ne permettaient pas d'obtenir des performances satisfaisantes pour un réseau VANET. C'est pourquoi il faut introduire la notion de qualité de service (QoS) pour les améliorer, et pouvoir ainsi répondre aux besoins des réseaux VANETs. L'optimisation des protocoles est donc une étape nécessaire. Nous avons déterminé précédemment que AODV est le protocole qui donne les meilleures performances, c'est donc avec ce protocole que nous allons appliquer nos propositions afin d'en améliorer les performances.

On trouve plusieurs propositions d'optimisations de AODV intéressantes. Les références [5][6] et [7] proposent chacune une optimisation de AODV basée sur une métrique de QoS différente. Elles permettent soit d'adapter le protocole au contexte des VANETs [5] [6], soit d'apporter une métrique supplémentaire dans la sélection de route [7]. Ces propositions ont été utilisées dans notre étude et sont détaillées dans la suite.

Cette partie a pour objectif de proposer et de tester différentes optimisations du protocole AODV afin d'améliorer avant tout le taux de paquets reçus. Pour ce faire, deux types d'optimisations seront testés : une optimisation visant à adapter AODV au contexte VANET (l'approche Tuning), et une optimisation visant à utiliser des critères de qualité de service dans le protocole AODV (l'approche Cross-layer).

3.5.1 Approche Tuning

Nous avons vu qu'en situation de simulation VANET réaliste, les performances sont dégradées. Il est donc nécessaire de modifier les protocoles réactifs pour pouvoir intégrer de la qualité de service, et améliorer ainsi leurs performances en les adaptant à ce domaine spécifique. Une première solution pour répondre à cet objectif consiste à adapter les paramètres des protocoles existants. L'objectif d'une telle adaptation est de mieux prendre en compte les contraintes des VANETs, c'est-à-dire principalement les ruptures de liens et les mécanismes liés à l'entretien des chemins. Pour ce faire, il faut adapter les mécanismes du protocole AODV à la dynamique des réseaux VANETs. Cela passe par une modification des paramètres du protocole. Comme tout protocole de routage, AODV fonctionne avec un certain nombre de messages différents, dont celui qui a un grand impact sur le *routing overhead* est le message *Hello*. Par ailleurs, un protocole fonctionne avec de nombreux *timers* qui permettent de gérer les états softstate. Comme nous allons le voir plus loin, ces derniers ne sont pas toujours adaptés à un fonctionnement dans un environnement avec une grande dynamique des noeuds et des liens sporadiques.

AODV - Hello Messages

L'un des mécanismes de base du protocole AODV consiste à maintenir le chemin de routage jusqu'à la fin de la transmission. Pour ce faire, outre les messages nécessaires à la découverte de routes, le protocole utilise trois différents types de messages :

- les messages *route time-out*, qui sont diffusés lorsqu'aucune activité n'est détectée sur un chemin pendant un certain temps,
- les messages *Hello*, qui sont diffusés périodiquement dans le réseau pour détecter la présence des nœuds voisins. Ces messages permettent ainsi de maintenir une route stable durant le transfert des paquets,
- les messages *route-error*, qui sont diffusés lors de la détection d'une rupture de route.

Perkins et al. [9], les créateurs de AODV, se sont posés la question de l'intérêt des messages *Hello*. Ils recensent plusieurs inconvénients à leur utilisation, comme la surcharge de message de routage qu'ils génèrent ou encore le fait qu'ils n'aident pas le mécanisme de recherche de route à proprement parler. Les recherches présentées dans [5] ont déjà abordé cette problématique et montrent des améliorations significatives en modifiant la fréquence d'envoi des messages *Hello*. Cependant, les conditions de simulation décrites dans ces recherches sont discutables. En effet, les simulations ont été effectuées avec un modèle de propagation et un modèle de mobilité très simplistes (two ray ground et random way point), ce qui peut amener à de fausses conclusions.

Les messages *Hello* sont envoyés périodiquement dans le réseau pour avoir une vision plus précise de celui-ci, mais ce mécanisme présente des inconvénients. L'envoi de messages *Hello* consomme des ressources dans le réseau et de la bande passante comme tous les autres messages, ce qui a pour conséquence de potentiellement augmenter les interférences et les collisions avec les données et les autres messages de contrôle. D'après les résultats obtenus dans [5], l'optimisation des timers des messages *Hello* peut augmenter drastiquement les performances de AODV. Les auteurs montrent que l'intervalle entre deux messages *Hello* doit être adapté à la vitesse des nœuds et à leurs puissances d'émission : plus vite la topologie du réseau change et plus faible doit être l'intervalle.

Pour aller dans le même sens que les auteurs de [5], nous avons implémenté une version de AODV que nous avons appelée « AODV Hello Msg » et dans laquelle l'intervalle entre deux messages *Hello* est déterminé par l'équation 3.1 :

$$Hello\ interval = \frac{VitesseMaximum}{Vitesse + \frac{VitesseMaximum}{2}} \quad (3.1)$$

Avec une vitesse maximum urbaine autorisée de 16m/s (50km/h), l'intervalle de *Hello* varie de 2s à 0,7s comme le montre la *figure 3.14*.

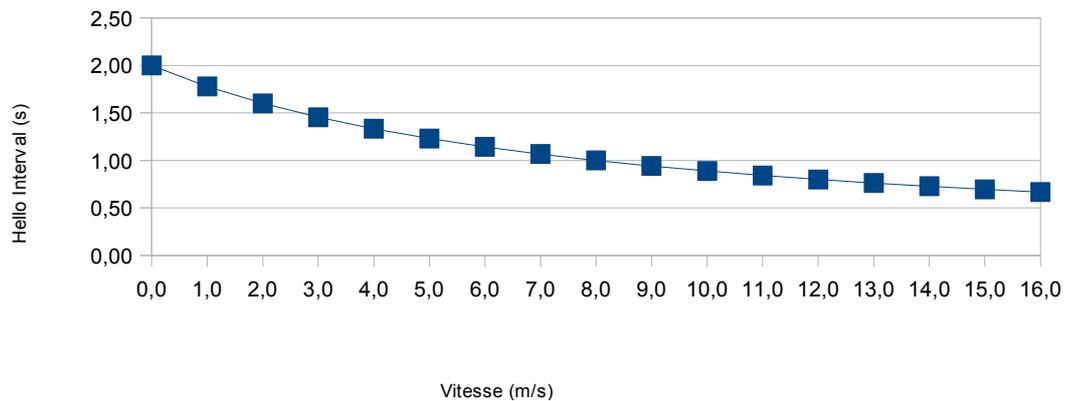


Figure 3.14 : Evolution de l'intervalle entre deux messages Hello.

Le choix des valeurs limites a été déterminé grâce à des simulations présentées dans [20].

AODV - Timers

Alors que bon nombre d'études comparatives utilisent AODV avec différentes métriques en fonction du contexte, les travaux présentés dans [6] se focalisent sur l'optimisation du protocole standard en modifiant ses paramètres, et plus particulièrement ses timers. Les résultats de ces simulation montrent des améliorations de performances avec une augmentation du taux de paquets reçus jusqu'à 4%. Le temps de transmission est tantôt plus important (jusqu'à 400 ms) tantôt plus faible (jusqu'à 200 ms) selon la méthode d'optimisation utilisée. Par contre, les conditions de simulation, à savoir le modèle de mobilité et le modèle de propagation utilisés, ne sont pas explicitées.

Les performances de AODV sont donc significativement influencées par le choix de ses paramètres de configuration. Adapter ces paramètres en fonction du contexte de simulation et visualiser leur impact réel sur le comportement du réseau reste une tâche difficile. Les auteurs de [6] essayent de répondre à cette problématique en utilisant plusieurs stratégies d'optimisation métaheuristique pour des configurations VANETs. Ces solutions consistent à fixer un paramètre à optimiser, et à lancer de grandes séries de simulations en boucle, pour déterminer les timers permettant d'optimiser le paramètre choisi.

Les simulations de AODV que nous avons menées jusqu'ici, l'ont été avec les paramètres standard du protocole AODV (tels qu'ils sont positionnés dans le simulateur NS-2). Les simulations de AODV avec des paramètres optimisés pour les VANETs présentés ci-après, ont été effectuées avec un jeu de paramètres extrait de [6]. Nous avons fait ce choix car les auteurs tentent d'optimiser le taux de paquets reçus plutôt que d'autres métriques. Selon eux, il s'agit de la meilleure stratégie d'optimisation. La méthode pour déterminer ces paramètres est une méthode métaheuristique. Dans la suite, cette version de AODV sera appelée «AODV Timers».

Le *tableau 3.3* présente les valeurs des paramètres de AODV Timers [6].

Paramètres	NS-2	Timers
ACTIVE ROUTE TIMEOUT	10s	1s
ALLOWED HELLO LOSS	3	1
MY ROUTE TIMEOUT	10s	2s
NET DIAMETER	30	20
NODE TRAVERSAL TIME	0,03s	0,01s
NET TRAVERSAL TIME	1s	0,4s
RREQ RETRIES	3	1
RREQ RATELIMIT	10s	1s
TTL START	5ms	1ms
TTL INCREMENT	2ms	1ms
TTL THRESHOLD	7ms	1ms

Tableau 3.3 : Paramètres de AODV standard et adaptés selon la méthode métaheuristique [6].

Les paramètres présentés dans le *tableau 3.3* sont les principaux paramètres définis par le RFC3561 [14] :

- ACTIVE ROUTE TIMEOUT détermine le temps de vie d'une route, c'est-à-dire combien de temps elle va rester active dans la table de routage, avant d'être supprimée. Ainsi, si le temps de transmission d'un paquet est plus long que ce temps, la transmission n'aboutira pas et il faudra relancer une recherche de route.
- ALLOWED HELLO LOSS représente le nombre de message *Hello* qui doivent être perdus pour que le protocole considère une rupture de route entre les noeuds. Plus ce nombre est faible et plus le réseau est réactif.
- MY ROUTE TIMEOUT est lié au paramètre ACTIVE ROUTE TIMEOUT et représente le temps maximum alloué pour qu'un message fasse un aller-retour entre l'émetteur et le récepteur. Ce temps est au minimum le double de ACTIVE ROUTE TIMEOUT car on estime que le temps retour doit être égal au temps d'aller sans quoi cela signifie une trop grande variabilité de la route.
- NET DIAMETER est le nombre de sauts maximum entre un émetteur et un récepteur. Il a un impact sur la taille des tables de routage, et les paquets ayant un nombre de sauts supérieur à la limite sont détruits.
- NODE TRAVERSAL TIME et NET TRAVERSAL TIME correspondent respectivement au temps maximum alloué pour qu'un paquet aille d'un noeud à l'autre, et pour qu'un paquet aille d'un bout à l'autre de la route.
- RREQ RETRIES est le nombre maximum de requêtes à envoyer avant de considérer qu'une recherche de route n'aboutit pas, RREQ RATELIMIT est le temps d'attente avant d'envoyer une nouvelle requête.
- Enfin, les TTL sont utilisés pour éviter une dissémination non nécessaire des messages de requêtes dans le réseau.

La technique de AODV Timers réduit presque tous les paramètres jusqu'à la valeur limite basse nécessaire au bon fonctionnement indiqué dans le RFC3561. L'objectif est de donner beaucoup plus de réactivité au protocole AODV.

Les paramètres présentés dans le *tableau 3.3* montrent clairement l'idée de l'adaptation du protocole. Puisque les ruptures de route sont nombreuses (*cf. figure 3.5a*) et que le mécanisme de réparation est souvent sollicité, cela semble être une bonne idée de régler les timers à une valeur optimale afin d'obtenir une plus grande réactivité. L'objectif n'est pas ici d'éviter les ruptures de route, qui par ailleurs sont issues directement de la couche physique et sont donc « incontrôlables », mais de pouvoir y réagir plus rapidement.

3.5.2 Performances de l'approche Tuning

Afin de pouvoir comparer les apports en performances de deux adaptations de AODV, les résultats des simulations sont présentées sur les *figures 3.15 et 3.16* :

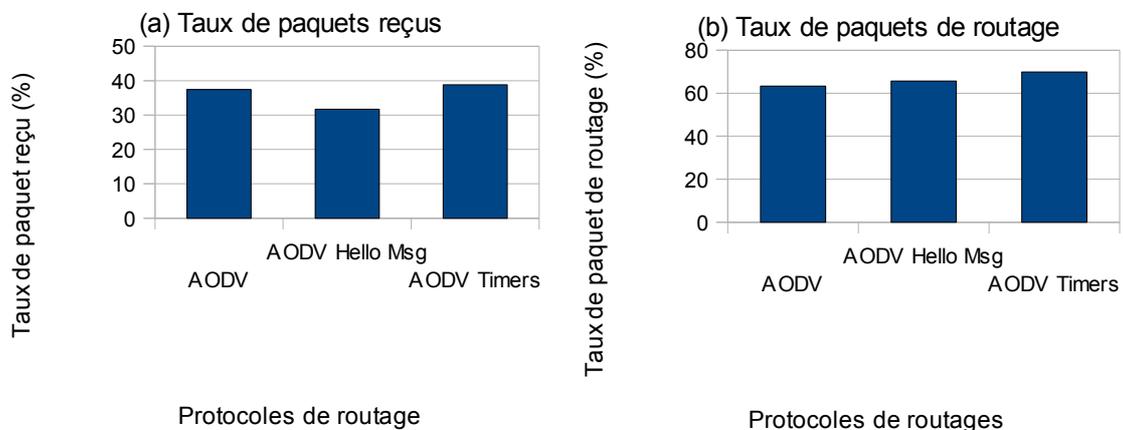


Figure 3.15 : Taux moyen de paquets reçus (a) et Taux moyen de paquets de routage (b) en fonction du protocole de routage.

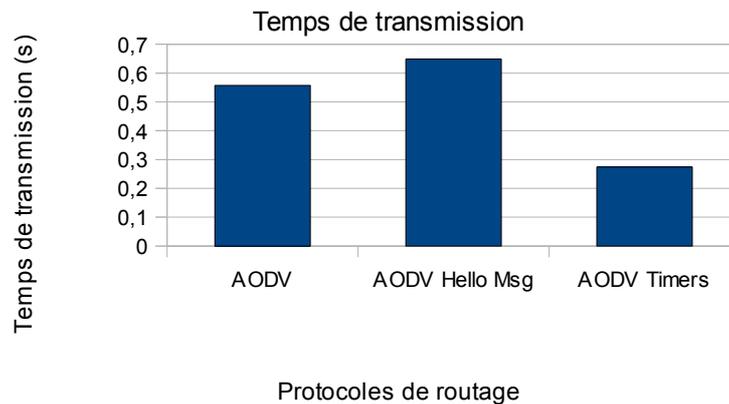


Figure 3.16 : Temps de transmission moyen en fonction du protocole de routage.

Les résultats de simulations présentés en *figures 3.15 et 3.16* montrent que contrairement aux résultats présentés dans [5], l'adaptation de l'intervalle des messages hello n'aide pas à améliorer les performances du protocole AODV, ni en terme de taux de paquets reçus, ni en terme de délai de transmission. Bien au contraire, cette modification du protocole AODV ne fait que détériorer chacune des métriques présentées ici. Fort de cette constatation, nous avons donc réalisé des tests complémentaires utilisant un intervalle de message *Hello*

fixe (présentés dans [20]). Ils montrent que l'intervalle standard de 1 seconde communément utilisé est bien adapté pour les VANETs (cf. *figure 3.17*). Aucun autre intervalle ne donne de meilleurs résultats. Cependant, ces tests montrent qu'un intervalle fixé à 2s ou 3s permet de réduire de moitié le nombre de messages de routage tout en ayant un impact mineur sur le taux de paquets reçus et le temps de transmission. Ils montrent également que la suppression totale des messages hello diminue significativement les performances du protocole.

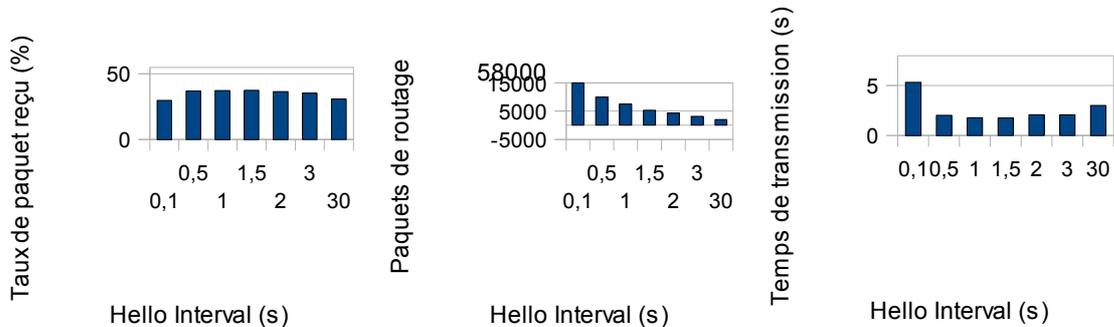


Figure 3.17 : Taux de paquets reçus, nombre de paquets de routage et temps de transmission avec un intervalle de message hello fixe [20].

Finalement, l'ensemble des résultats de simulations présentés sur la *figure 3.17* montre que l'intervalle standard de 1s est un bon compromis si on souhaite privilégier le critère de taux de paquets reçus. Néanmoins, les résultats obtenus avec un intervalle fixe de 2s ou 3s ne sont pas dénués d'intérêt. En effet, la perte en terme de taux de paquets reçus reste limitée (de l'ordre de 1% ou 2%) et l'augmentation moyenne observée du délai est de 0,3s et 0,31s alors que le gain en nombre de paquets de routages est de 3177 et 4325, soit environ 50% de gain par rapport au 7445 du protocole standard. Si la métrique privilégiée était uniquement le taux de paquets de routage, alors l'optimisation « AODV Hello Msg » avec un intervalle fixe serait une alternative intéressante.

Parallèlement, les résultats de simulation présentés en *figures 3.15 et 3.16* montrent que la version Tuning de AODV est celle qui donne les meilleurs résultats aussi bien en terme de taux de paquets reçus qu'en terme de temps de transmission. Ceci corrobore les résultats présentés dans la référence [6] et valide la méthode d'optimisation qui y est décrite. Malheureusement, le gain de taux de paquets reçus n'est que de 1,5% (cf. *figure 3.15a*) : il n'y a donc pas d'amélioration significative. Aussi, cette optimisation apporte certes de la qualité de service, mais ne permet pas à elle seule de compenser le faible taux de paquets reçus du protocole AODV observé dans le contexte VANET.

3.5.3 Approche cross-layer

On notera que jusqu'ici la seule métrique prise en compte est le nombre de sauts. Il serait donc intéressant de pouvoir intégrer dans le protocole AODV une métrique de niveau physique qui influe sur la sélection de route dans l'algorithme de routage.

Le problème majeur des VANETs, à savoir les ruptures de liens, étant lié aux comportements du canal radio mobile, il est intéressant de choisir une métrique permettant de prendre en compte ce comportement afin de la remonter au niveau routage pour optimiser l'algorithme [7].

Les techniques qui utilisent des métriques issues d'une couche du modèle OSI en y ajoutant des métriques issues d'une autre couche, sont appelées « cross-layer ». C'est précisément ce que nous allons expérimenter dans cette partie, à savoir modifier l'algorithme de routage de AODV avec une métrique issue de la couche physique. La métrique que nous allons mettre en oeuvre est le Taux d'Erreur Binaire (TEB) qui donne une bonne indication sur la qualité du lien radio.

L'objectif de notre contribution est ici de proposer un algorithme qui va permettre de sélectionner des chemins fiables et robustes pour éviter au maximum les ruptures de routes, et faire appel le moins possible aux mécanismes de réparation de routes. Ainsi, il s'agit d'ajouter dans le protocole un mécanisme qui écarte les liens radio potentiellement inaptes au transit de données. Pour ce faire, nous avons choisi de nous focaliser sur le critère TEB. Ce critère donne une information sur la qualité d'un lien radio, et c'est cette information qui va nous permettre de sélectionner ou non les liens que le protocole de routage va pouvoir utiliser. Ce faisant, nous espérons obtenir des routes de bonne qualité entre les noeuds, permettant ainsi de meilleures communications.

Il faut noter qu'il y a d'autres métriques que le TEB qui peuvent servir pour optimiser les protocoles de routage dédiés aux VANETs. Deux métriques particulièrement intéressantes à ce sujet évoquées dans [21] sont « la capacité du canal de propagation » et « la probabilité de coupure ». Ces métriques donnent également de bonnes indications sur la qualité des liens radioélectriques et sont une piste intéressante pour des travaux futurs.

AODV – TEB

L'objectif de cette modification est de permettre de choisir de meilleurs chemins pour acheminer les paquets de données jusqu'à leur destination. Le choix du TEB permet d'écartier les chemins qui sont jugés inappropriés à l'acheminement des paquets dans de bonnes conditions.

La recherche de route de AODV a été modifiée avec une méthode qui consiste à supprimer des routes de la recherche car leur TEB est trop élevé. Une route dont le taux d'erreur par paquet est supérieur à 10% [24] va entraîner des ruptures de lien ce qui provoquera inmanquablement, la nécessité de faire des retransmissions ou même, une nouvelle recherche de route. En supprimant l'accès à ces liens par un filtrage, nous aurons l'avantage de ne garder que des routes fiables. Mais, nous aurons l'inconvénient de supprimer des liens parfois nécessaires. En effet, ils peuvent être indispensables pour établir une route entre l'émetteur et le récepteur, quand c'est l'unique solution.

L'algorithme que nous avons mis en oeuvre s'exprime de la manière suivante:

Réception d'un paquet de routage
Si, TEB du lien emprunté > 1.10^{-5} alors
le paquet est rejeté (3.2)
Sinon
le paquet est pris en compte

Le choix du seuil a été fixé d'après les travaux réalisés dans [7] et en fonction des résultats obtenus après différentes simulations comparatives. Dans la suite, cet algorithme qui intègre cette modification est appelé AODV TEB.

L'intégration de paramètres cross-layer dans OLSR et ZRP a également été réalisée par Tiguiane Yelemou de la même manière que pour AODV. Une étude complète de ces protocoles est décrite dans sa thèse. Un comparatif global entre les performances des différents protocoles est présenté dans la référence [22].

AODV – Size

Pour les communications sans fil, il existe un lien entre la taille des paquets à transmettre et la qualité du lien nécessaire pour envoyer l'ensemble de l'information sans erreur. Le nombre de retransmissions de paquets est lié au taux d'erreur binaire. En considérant que les bits qui composent le paquet ne sont pas corrélés, la relation entre le taux d'erreur par paquets (TEP) et le TEB s'écrit :

$$TEP = 1 - (1 - TEB)^n \quad (3.3)$$

avec n la taille des paquets en bits.

On peut montrer [25][26] que le nombre moyen de retransmissions pour transmettre un paquet sans erreur est donné par : $1/(1-TEP)$. On peut alors en déduire le nombre moyen de retransmissions en fonction du TEB de la liaison et de la taille du paquet [25][26] :

$$Nb_{transmissions} = \frac{1}{(1 - TEB)^n} \quad (3.4)$$

Le *tableau 3.4* présenté ci-après montre le nombre de retransmissions estimé pour des paquets de 512 octets en fonction de différentes valeurs de TEB:

TEB	Nb _{transmissions}
10^{-5}	1,05
10^{-4}	1,51
$2 \cdot 10^{-4}$	2,27
$3 \cdot 10^{-4}$	3,42
$4 \cdot 10^{-4}$	5,15
$5 \cdot 10^{-4}$	7,76

Tableau 3.4 : Nombre de retransmissions estimées en fonction du TEB.

L'équation (3.4) permet de déterminer le nombre moyen de retransmissions nécessaire pour transmettre un paquet entre un nœud A et un nœud B. Par exemple, un paquet de 512 octets transmis sur un lien radioélectrique avec un TEB de $5 \cdot 10^{-4}$ nécessite en moyenne 8 retransmissions pour atteindre sa destination (*cf. Tableau 3.4*). Ne serait-il pas plus efficace de faire quelques sauts supplémentaires plutôt que retransmettre les paquets plusieurs fois ? L'algorithme utilisé dans cette partie est directement lié à cette problématique et essaye d'y apporter une solution.

Comme nous venons de voir que le nombre de retransmissions est directement lié au TEB et à la taille des paquets, nous avons pris en compte ces deux paramètres dans la mise en oeuvre d'un algorithme de sélection de paquets. L'algorithme proposé dans cette partie combine la métrique de taux d'erreur binaire à la taille de chaque paquet. Ainsi, la méthode qui consiste à écarter des routes est conservée, et elle est, de plus, adaptée à la taille des paquets. Les paquets de petite taille seront autorisés à emprunter des routes que des paquets de plus grandes tailles ne pourront utiliser. Cet algorithme a pour but de créer des routes limitées à certains paquets en fonction de leur taille, évitant ainsi les retransmissions ainsi que les collisions et améliorant les performances globales du protocole.

Pour ce faire, le paramètre de la taille des paquets de données a été ajouté dans la recherche de route. De façon pratique, ce paramètre est rajouté dans les messages de requête AODV, puis pris en compte dans l'algorithme de la manière suivante :

Si, Taille de paquets de données ≤ 128 bytes
Si TEB du lien $> 12 \cdot 10^{-4}$ alors le paquet est rejeté
Sinon le paquet est accepté
Si, Taille de paquets de données > 128 bytes et ≤ 512 bytes
Si TEB du lien $> 6 \cdot 10^{-4}$ alors le paquet est rejeté
Sinon le paquet est accepté (3.5)
Si, Taille de paquets de données > 512 bytes et ≤ 1024 bytes
Si TEB du lien $> 2 \cdot 10^{-4}$ alors le paquet est rejeté
Sinon le paquet est accepté
Si, Taille de paquets de données > 1024 bytes
Si TEB du lien $> 1 \cdot 10^{-4}$ alors le paquet est rejeté
Sinon le paquet est accepté

Le choix des seuils a été fixé en fonction des résultats obtenus avec l'équation 3.4.

3.5.4 Performances de l'approche cross-layer

Tout comme cela a déjà été fait précédemment pour les autres évaluations de protocoles, nous présentons sur les figures 3.18 et 3.19 les résultats comparatifs entre les optimisations cross-layers :

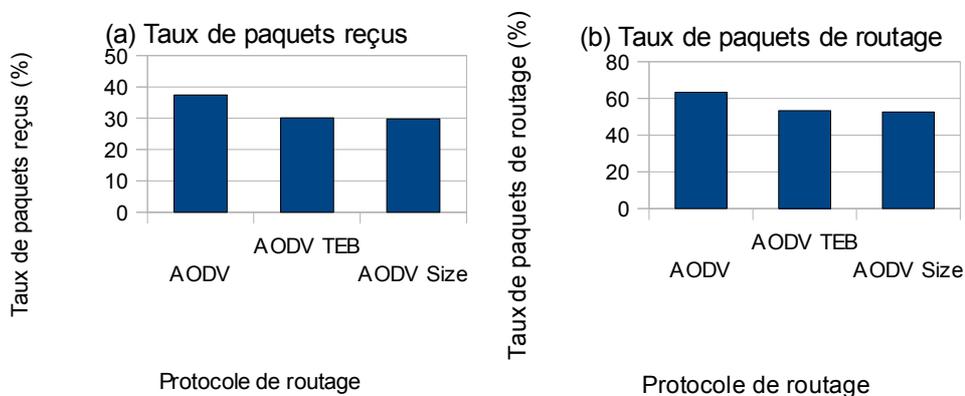


Figure 3.18 : Taux moyen de paquets reçus (a) et Taux moyen de paquets de routage (b) en fonction du protocole de routage.

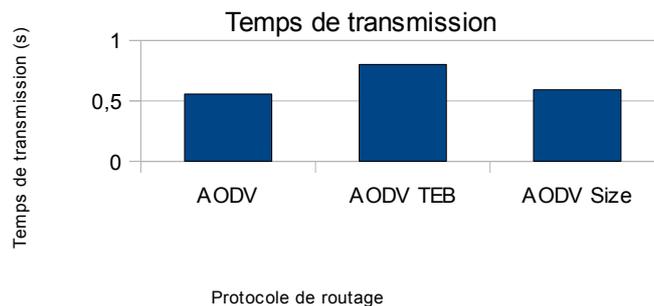


Figure 3.19 : Temps moyen de transmission en fonction du protocole de routage.

Les résultats de simulation présentés en figures 3.18 et 3.19 montrent que le cross-layer associé à un algorithme écartant des routes, n'améliore pas le taux de paquets reçus. Le fait de supprimer des routes possibles pour privilégier d'autres chemins de meilleure qualité ne permet pas d'acheminer les paquets en plus grande quantité. Quel que soit l'algorithme utilisé, les résultats en terme de taux de paquets reçus de l'optimisation cross-layer restent inférieurs à ceux reçus en utilisant le protocole standard.

En revanche, on constate que cette méthode améliore le taux de messages nécessaires au fonctionnement du protocole de routage. Ceci est logique puisque de nombreuses routes sont simplement ignorées à cause de leur TEB trop important, réduisant ainsi la charge de routage. Les paquets sont envoyés mais ignorés en réception si le lien est jugé mauvais, limitant ainsi la propagation des messages. Comme ces messages ne sont pas propagés, le taux de paquets de routage diminue. Cet avantage reste cependant mineur par rapport à la réduction de taux de paquets reçus. Enfin, on peut constater qu'en adaptant le TEB maximum autorisé à la taille des paquets, le protocole obtient de meilleurs résultats en terme de temps de transmission. Les petits paquets ont l'opportunité d'emprunter des routes plus courtes, qui sont impraticables pour les paquets de grande taille.

Ainsi, l'optimisation qui adapte le seuil de TEB à la taille des paquets, permet d'obtenir de la qualité de service en temps de transmission par rapport à la version classique à seuil fixe. Alors que les métriques du taux de paquets reçus et du taux de paquets de routage restent constantes entre AODV TEB et AODV Size, le temps de transmission moyen est réduit de 0,8s à 0,6s (cf. figure 3.19).

Les méthodes d'optimisation cross-layer proposées ici permettent de réduire le taux de paquets de routage. Malheureusement, elles réduisent également le taux de paquets reçus et augmentent le délai de transmission. Ceci s'explique par la suppression de nombreuses routes jugées inaptes à la communication ; comme il n'y a pas de meilleures routes trouvées, alors l'optimisation ne donne pas les résultats escomptés. On peut cependant espérer de meilleurs résultats dans un contexte VANET plus dense, avec plus de possibilités de routes entre l'émetteur et le récepteur. Cela reste une perspective intéressante car susceptible de donner de meilleurs résultats avec ces méthodes.

Cependant, pour notre environnement VANET, les méthodes proposées ici n'ont pas permis d'améliorer les performances de AODV. Le protocole standard est celui qui obtient toujours les meilleurs résultats, notamment en terme de taux de paquets reçus.

Les méthodes cross-layer proposées ici, ainsi que les optimisations du protocole proposées dans la *partie 3.3.1* ne permettent pas à elles seules d'améliorer significativement les performances de routage dans notre environnement VANET réaliste. La remarque est également valable pour les autres protocoles réactifs présentés dans la *partie 3.4.1*. Aussi, puisqu'une optimisation ne permet pas à elle seule d'améliorer significativement la QoS, une solution est de combiner différentes solutions d'optimisations pour y parvenir.

3.6 Optimisation des liens physiques - Cas du MIMO.

Les propositions d'optimisations et/ou d'améliorations du routage testées jusqu'à maintenant dans ce chapitre ne parviennent pas à donner une réponse satisfaisante sur les trois métriques observées que sont : le taux de paquets reçus, le taux de paquets de routage et le temps de transmission. Le protocole qui présente le meilleur taux de paquets reçus moyen est AODV Tuning (*Partie 3.4.2*) avec 38,81%. Ce résultat est loin d'être satisfaisant. Il existe encore bien d'autres méthodes pour optimiser les algorithmes existants, ainsi que diverses métriques cross-layer ou autre que l'on peut intégrer dans les mécanismes existants. Le travail consistant à tester tous les protocoles de routage et toutes les optimisations existants sur une plate-forme dédiée VANET n'est pas réaliste.

Au regard des simulations présentées dans cette thèse, la solution consistant à se focaliser uniquement sur des optimisations simples du routage pour améliorer les performances des communications, semble limitée. Nous avons vu dans le *chapitre 1* que le transport des données est plus efficace sur des liens de bonne qualité. Aussi, avant de penser à optimiser le routage, il faut essayer d'optimiser au maximum les liens radios notamment au niveau de la robustesse. La technique MIMO est connue pour améliorer la robustesse d'un canal de transmission, aussi nous allons la prendre en compte pour améliorer les performances multi-sauts dans un environnement VANET. Cette technique a été implémentée dans le simulateur (*cf Chapitre 2.2.2*). Ainsi, une solution intéressante consiste à utiliser les protocoles les plus efficaces en termes de performances sur un canal MIMO. Le protocole AODV Tuning est le plus performant des protocoles testés en terme de taux de paquets reçus, et le protocole DYMO est le plus performant des protocoles testés en terme de temps de transmission. Tous deux sont des candidats idéaux pour un couplage avec un canal MIMO.

Dans cette partie, les propositions sont mises en œuvre pour tenter de maximiser les performances en terme de taux de paquets reçus et en terme de temps de transmission.

AODV Timers – configuration MIMO

La combinaison de la technique MIMO et de l'optimisation des timers semble être la meilleure solution pour obtenir un taux de paquets élevé puisque chacune des deux solutions permet d'améliorer ce critère. En effet, si on associe des liens robustes à la réactivité de l'optimisation timers, alors on devrait obtenir des performances améliorées par rapport au cas SISO. En effet, l'optimisation timers permet au protocole de s'adapter très rapidement aux changements topologiques du réseau, et l'optimisation MIMO permet de gagner en robustesse. Ainsi, le protocole devrait pouvoir mieux s'adapter au réseau en utilisant des liens plus robustes de manière réactive, et ainsi acheminer plus de paquets à la destination.

Ainsi, parmi toutes les propositions testées de cette thèse, cette solution a la plus grande probabilité de répondre aux besoins des VANETs en terme de QoS. Les simulations de AODV timers en configuration MIMO sont effectuées avec le standard 802.11n, proche du 802.11p et capable d'intégrer la technique MIMO.

DYMO – configuration MIMO

L'amélioration de DYMO par rapport à AODV en temps de transmission est significative. Aussi, la combinaison de DYMO avec une configuration MIMO semble le meilleur moyen de maximiser les performances en temps de transmission. En effet, si les liens sont plus robustes, alors le protocole DYMO aura moins besoin d'utiliser son mécanisme de réparation de route, et même dans le cas où cela s'avère nécessaire, les nouvelles routes seront trouvées plus rapidement.

Ainsi, avec un appel moins fréquent au mécanisme de réparation et un temps de recherche de route réduit, le temps de transmission devrait être plus faible en configuration MIMO qu'en configuration SISO. Les simulations de AODV Tuning en configuration MIMO sont également effectuées avec le standard 802.11n, pour les mêmes raisons.

Performances globales de l'optimisation MIMO

Tout comme pour les autres évaluations de protocoles, nous présentons sur les résultats comparatifs entre les protocoles testés pour les cas SISO et MIMO sur les *figures 3.20 et 3.21* :

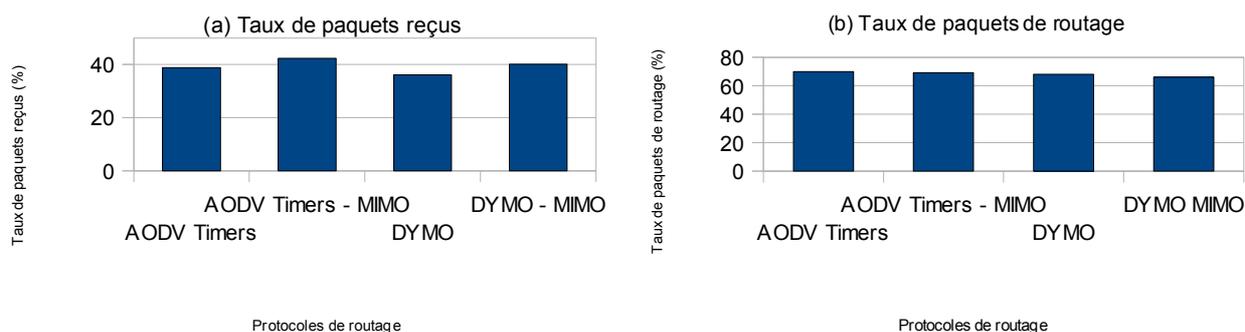


Figure 3.20 : Taux moyen de paquets reçus (a) et Taux moyen de paquets de routage (b) en fonction du protocole de routage.

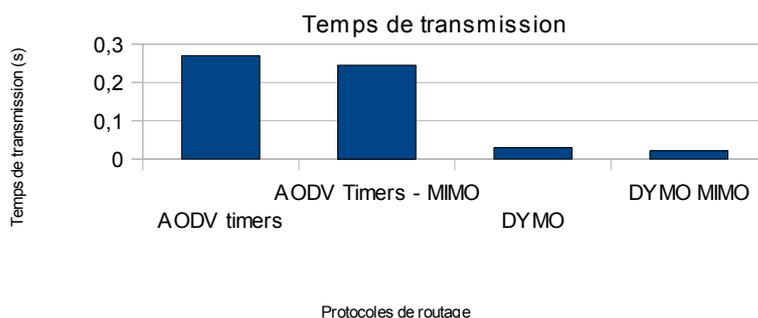


Figure 3.21 : Temps moyen de transmission en fonction du protocole de routage.

La *figure 3.20a* montre les résultats en terme de taux de paquets reçus des différentes configurations MIMO simulées. Il ressort de ce graphique que les deux techniques les plus efficaces sont les méthodes utilisant la technologie MIMO. Le taux de paquets reçus obtenu avec AODV timers dans une configuration MIMO est de 42%, et celui obtenu par le protocole DYMO est de 40%, soit respectivement 2% et 4% de plus que les mêmes protocoles en configuration SISO. Les meilleurs résultats obtenus au cours de l'ensemble des simulations de ce chapitre, en terme de taux de paquets reçus, sont ainsi dus à l'association de la technique

MIMO avec la méthode Tuning des timers. Sur la *figure 3.20b*, on voit les résultats en terme de taux de paquets de routage. Les améliorations obtenues grâce à la technique MIMO sont de 0,5% et 2% pour respectivement AODV timers et DYMO. La technique MIMO permet donc d'améliorer simultanément le taux de paquets reçus et la taux de paquets de routage.

Enfin, sur la *figure 3.21*, on peut voir le temps de transmission moyen en fonction de chaque protocole. Le protocole DYMO obtient des résultats largement meilleurs avec un temps de transmission inférieur à 0,1s. Le fait de ne pas relancer le mécanisme complet de recherche de route permet de gagner beaucoup de temps lors d'une rupture de route, et la technologie MIMO qui permet d'obtenir des liens plus stables vient apporter un soutien pour le maintien des routes. Alors que le temps de transmission moyen de DYMO en configuration SISO n'est déjà que de 0,03s, ce temps est encore amélioré et passe à 0,02s avec la technique MIMO. Cela confirme ainsi que DYMO améliore de manière significative les performances en temps de transmission, fournissant ainsi une bonne solution si l'on souhaite en plus privilégier ce critère.

Les *figures 3.20 et 3.21* montrent que, selon la qualité de service requise, telle ou telle méthode sera la plus adaptée. Si on veut privilégier le taux de paquets reçus, alors la méthode AODV Timers est la meilleure solution parmi les propositions de cette thèse ; et si c'est le temps de transmission qui est prioritaire, alors le protocole DYMO représente la bonne solution. Mais on constate que quel que soit le choix du critère de QoS à privilégier, c'est toujours dans la configuration MIMO que cette mesure sera la plus optimale.

Pour tenter de confirmer ou d'infirmer cette remarque, nous allons étudier l'impact du MIMO sur les 30 situations de simulation. La *figure 3.22* présente ces résultats :

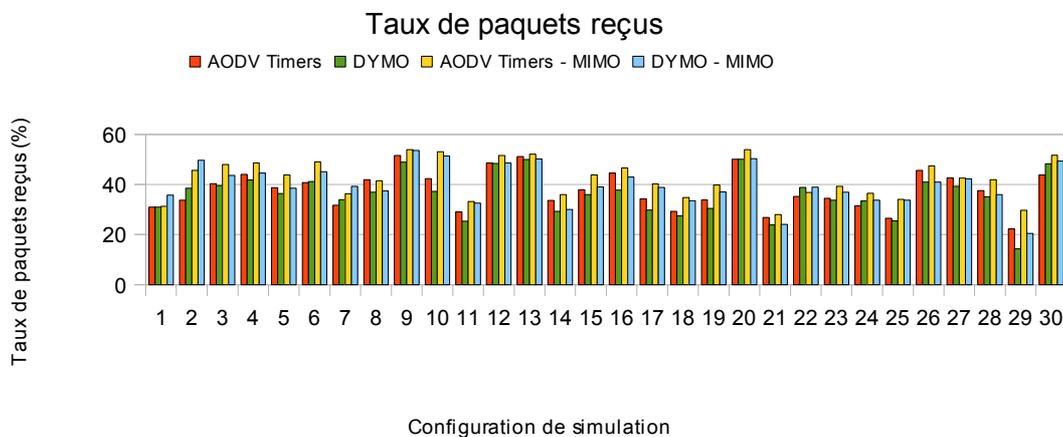


Figure 3.22 : Temps de transmission moyen en fonction du protocole de routage.

La *figure 3.22* permet de constater que les résultats en configuration MIMO sont systématiquement meilleurs, en terme de taux de paquets reçus, que ceux en configuration SISO. L'apport de performance lié à la couche PHY semble plus efficace que les différentes optimisations effectuées à la couche NET. Ainsi, l'ensemble des protocoles testés sont plus performants en configuration MIMO, mais ces résultats restent faibles avec un taux de paquets reçus qui n'atteint jamais les 60% quel que soit le protocole utilisé, quelle que soit la technique de transmission utilisée et quelle que soit la configuration de simulation. La configuration de simulation 15 donne des résultats fidèles aux résultats moyens.

Résultats détaillés

La *figure 3.23* présente le nombre de ruptures de route par communication, ainsi que la quantité de routes découvertes pour chacun des protocoles. La technique MIMO est une amélioration de la robustesse du canal physique, elle n'impacte donc pas les mécanismes de découvertes de route des protocoles de routage, et par la même, le nombre de découvertes de route. En revanche, comme la couche physique est plus robuste, il y a moins de ruptures de route. Cela entraîne également quelque découvertes de route en moins. En effet, tant qu'une route n'est pas brisée, il est inutile de relancer le mécanisme de recherches de route.

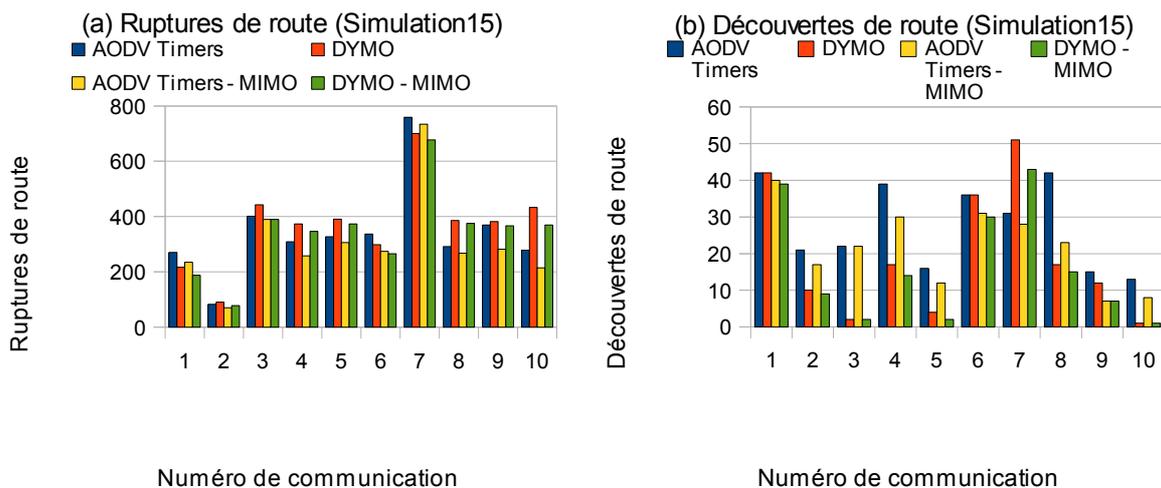


Figure 3.23 : Nombre de ruptures de route (a) et nombre de découvertes de route (b) pour chaque protocole.

Pour les différentes configurations MIMO, on constate une diminution du nombre de ruptures de route pour chacune des communications en fonction du protocole de routage (*cf. figure 3.23b*). Cette diminution du nombre de ruptures de route est l'explication de l'amélioration des performances de la technique MIMO par rapport à la technique SISO.

De plus, on constate que la technique MIMO n'a pas d'impact sur les mécanismes de routage, les tendances de chaque protocole restent les mêmes en configuration SISO et en configuration MIMO, seule la valeur des métriques mesurées change.

Enfin, du point de vue des ruptures et des découvertes de route (*cf. figure 3.23*), on remarque que c'est le protocole AODV Timers en configuration MIMO qui obtient les meilleures performances. Ceci vient confirmer les résultats moyens de la *figure 3.20a*, qui montrent que le protocole AODV Timers en configuration MIMO est la meilleure solution proposée dans cette thèse en terme de taux de paquets reçus.

Pour le cas du protocole DYMO, on observe les mêmes tendances quant aux améliorations MIMO. On trouve donc également des résultats améliorés pour ce protocole par rapport au cas SISO. Cela se vérifie avec le délai moyen d'établissement d'une route, comme le montre la *figure 3.24* :

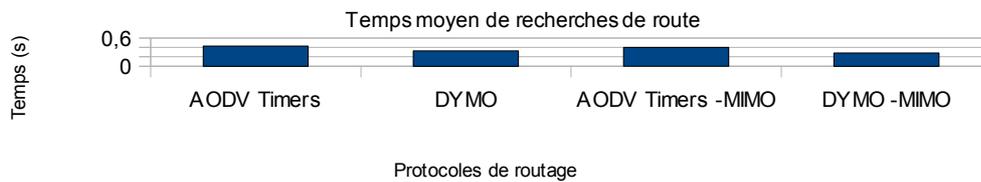


Figure 3.24 : Temps moyen de recherche de route.

Le délai moyen de recherches de route de AODV Timers est de 0,43s et celui de DYMO est de 0,33s. En configuration MIMO, pour les mêmes protocoles, ces temps sont respectivement diminués jusqu'à 0,4s et 0,28s, ce qui permet d'expliquer le gain de temps de transmission apporté par le MIMO (cf. figure 3.21).

Synthèses et conclusions

L'idée principale développée tout au long de cette section, est que le protocole de routage ne peut pas améliorer à lui tout seul une couche physique instable. Inversement, si la couche physique est de bonne qualité, alors les protocoles peuvent fournir de bonnes performances. Ainsi, les différentes optimisations croisées proposées ici apportent des éléments de réponse quant à la problématique de qualité de service, principalement la technique MIMO. Cependant elles ne permettent pas à elles seules de donner une solution définitive. La variabilité des résultats d'un protocole à l'autre est négligeable dans la majorité des cas, et aucune amélioration significative du taux de paquets reçus moyen n'a été trouvée. On ne peut se satisfaire d'une telle qualité de service pour le bon fonctionnement des VANETs. Ainsi, la technique MIMO ne permet pas à elle seule de donner une solution définitive. Ce challenge de QoS reste d'actualité, et d'autres contributions sont encore nécessaires pour pouvoir y répondre.

Conclusion

Ce chapitre a présenté différents protocoles de routage pour acheminer des données dans un contexte VANETs. Chacun de ces protocoles a été testé sur la plate-forme dédiée aux VANETs présentée dans le *chapitre 2*. Nous avons suivi une approche mettant en oeuvre une méthode heuristique de sélection du meilleur parmi plusieurs en fonction des métriques mesurées. Cette méthode heuristique a été appliquée à différentes familles de protocoles, puis au sein de la famille la plus performante, puis en fonction d'améliorations proposées.

Les ruptures de route constituent le facteur majeur de dégradation de la QoS dans les VANETs souligné dans ce chapitre. Les ruptures de routes sont induites par des ruptures de liaisons. Pour obtenir des performances intéressantes, c'est contre ce phénomène que doit lutter le protocole de routage. Comme celui-ci ne peut empêcher les ruptures de routes, il faut qu'il puisse s'adapter et réagir au mieux lorsqu'elles surviennent. C'est donc le mécanisme de réparation des routes qui doit faire l'objet d'une attention toute particulière pour les VANETs. La cause du grand nombre de ruptures de routes est due à la diversité des situations provoquée par le simulateur réaliste. En effet, selon le déplacement des véhicules et selon la position des obstacles, on trouve une multitude de cas de figure dans les simulations VANETs, et aucun protocole ne peut répondre simultanément de manière optimale à toutes les situations.

Parmi les protocoles topologiques, nous avons vu que ce sont les protocoles réactifs qui offrent les meilleurs résultats dans le contexte VANET. Au sein de la famille des protocoles réactifs, le protocole AODV offre le meilleur taux de paquets reçus. Le protocole DYMO offre quant à lui le meilleur temps de transmission. Enfin, le protocole AOMDV offre le meilleur résultat en terme de limitation de la surcharge du réseau. Chaque protocole permet d'améliorer l'une ou l'autre des mesures sans toutefois optimiser l'ensemble de celles-ci. Ainsi, chaque algorithme de routage peut être rattaché à une qualité de service en fonction des performances qu'il permet d'atteindre : en fonction de la métrique étudiée, le protocole qui donne le meilleur résultat n'est pas le même. Il faudra donc décider du protocole de routage en fonction de la priorité à accorder à l'une ou l'autre de ces métriques.

Avec pour but d'optimiser le taux de paquets reçus, différentes optimisations du protocole AODV ont été testées par la méthode appelée « timers ». Nous avons vu que le taux maximal de remise de paquets avec cette optimisation simple atteint un maximum de 51,6% (*cf. figure 3.22*). Finalement, la meilleure solution est de combiner l'apport du MIMO avec les algorithmes performants présentés. On voit que quel que soit l'algorithme de routage, si la couche physique est de bonne qualité, le protocole de routage pourra établir les routes nécessaires à la communication. En revanche, si la couche physique ne permet pas de transmettre l'information, le protocole de routage n'a aucune possibilité d'intervention. Aussi, les optimisations dans les communications VANETs ne sont peut-être pas à chercher uniquement au niveau de la couche réseau, mais aussi et surtout au niveau de la couche physique.

Toutes les propositions d'optimisations et/ou d'améliorations des algorithmes de routages ne sont pas satisfaisantes pour répondre au contexte des VANETs. Il existe différentes méthodes pour optimiser les algorithmes existants. Le travail, consistant à tester toutes les propositions de protocoles de routage existants et toutes les optimisations existantes

sur une plate-forme dédiée VANET serait long et fastidieux et ne serait donc pas réaliste. Nos travaux proposent une étude qui se focalise sur les protocoles topologiques classiques et sur des optimisations visant à améliorer les performances des VANETs. Le domaine dédié aux VANETs est très actif et de nouvelles investigations, avec d'autres algorithmes de routage ou d'autres méthodes d'optimisation, doivent être menées afin d'établir de manière claire la meilleure solution de routage. Les pistes de la famille des protocoles GeoCast, toutes les optimisations successives des protocoles AOMDV et DYMO, ainsi que toutes celles évoquées au cours de ce chapitre, représentent des perspectives de travaux futurs.

Bibliographie

- [1] W. Hamidouche, R. Vauzelle, C. Olivier, Y. Pousset, and C. Perrine, "Impact of realistic mimo physical layer on video transmission over mobile ad hoc network", 20th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium, PIMRC 2009, 2009.
- [2] B. Paul, Md. Ibrahim, Md. Abu Naser Bikas, "VANET Routing Protocols: Pros and Cons", International Journal of Computer Applications, arXiv:1204.1201, 2011.
- [3] Kerper, W. Kiess, M. Mauve, "Coordinated VANET Experiments, a Methodology and First Results", Sixth ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking, VANET'09, China, 2009.
- [4] H. Boeglen, J.-F. Cailbault, B. Hilt, R. Vauzelle, "A poor man's VANET Channel sounder", Journées Nationales des Communications dans les Transports Terrestres 2012, JNCTT 2012, Clermont-Ferrand, 2012.
- [5] E. Natsheh, A. Jantan, S. Khatun, S. Subramaniam, "Adaptive Optimizing of Hello Messages in Wireless Ad-Hoc Networks", International Arab Journal of Information Technology, 2007.
- [6] J. Garcia-Nieto, E. Alba, "Automatic Parameter Tuning with Meta heuristics of the AODV Routing Protocol for Vehicular Ad-Hoc Networks", Applications of Evolutionary Computation, Springer Berlin / Heidelberg, pages 21-30, 2010.
- [7] J. Ledy, H. Boeglen, H. Hilt, A. Abouaissa, R. Vauzelle, "An enhanced AODV protocol for VANETs with realistic radio propagation model validation", 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, ITST 2009, 2009.
- [8] J. Haerri, 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, Italy, 2007.
- [9] C.E. Perkins, E.M. Blkding-Royer, "The Ad Hoc on-demand distance-vector protocol", Ad Hoc Networking, pages 173-219, Addison-Wesley Longman Publishing Co., 2001.
- [10] T. H. Clausen, G. Hansen, L. Christensen, G. Behrmann, "The optimized link state routing protocol, evaluation through experiments and simulation", IEEE Symposium on Wireless Personal Mobile Communication 2001, 2001.
- [11] Z. J. Haas, M. R. Pearlman, "ZRP : a hybrid framework for routing in Ad Hoc networks", Ad hoc networking 2001, Addison-Wesley Longman, pages 221-253, 2001.
- [12] A. Rahman, S. Azad, F. Anwar, A. H. Abdalla, "A performance comparison of proactive and reactive routing protocols of mobile ad- hoc network (MANET)", Journal of Engineering and Applied Sciences, Medwell Journals, pages 891-896, 2007.
- [13] R. K. Jha, S. V. Limkar, U. D. Dalal, "A performance comparison of routing protocols for security issue in wireless mobile ad hoc networks", International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, ICETET 2012, 2010.
- [14] <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [15] P. Fazio, F. De Rango, C. Sottile, P. Manzoni, C. Calafate, "A distance vector routing protocol for VANET environment with Dynamic Frequency assignment", Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2011, 2011.
- [16] M.K. Marina, S.R. Das, "On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks", Ninth International Conference on Network Protocols, ICNP 2001, 2001.

[17] C. Sommer, F. Dressler, “The DYMO Routing Protocol in VANET Scenarios” , University of Erlangen-Nuremberg, Germany, 2009.

[18] http://masimum.inf.um.es/fjrm/wp-uploads/dymoum/dymoum_ns-2.34_v0.3.patch

[19] D-W. Kum, J-S. Park, Y-Z. Cho, B-Y. Cheon, “Performance Evaluation of AODV and DYMO Routing Protocols in MANET”, 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2010, 2010.

[20] J. Ledy, B. Hilt, H. Boeglen, A. Poussard, R. Vauzelle, “AODV enhancements in a realistic VANET context”, Third International Conference on Wireless Communications in Unusual and Confined Areas, ICWCUCA 2012, France, 2012.

[21] S. Bouhadi, J. Ledy, A-M. Poussard, “UM-CRT model optimisation”, Journées Nationales des Communications dans les Transports Terrestres 2011, JNCTT 2011, Colmar, 2011.

[22] T. Yelemou, J. Ledy, B. Hilt, A.-M. Poussard, P. Meseure, “Performance comparison of BER-based routing protocols under realistic conditions”, IEEE 36th Conference on Local Computer Networks, LCN 2011, 2011.

[23] <http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>

[24] “IEEE Standard for information technology - Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements”, Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE std 802.11p, 2010.

Conclusion générale

Ce travail de thèse, au sein des laboratoires XLIM-SIC de Poitiers et MIPS-GRTEC de Colmar, s'inscrit dans le cadre de la simulation et de l'optimisation des réseaux VANETs. Il a permis de mettre au point une plate-forme de simulation réaliste dédiée aux VANETs et de tester plusieurs propositions afin d'améliorer les performances du routage dans ces réseaux, quand ils sont simulés dans des conditions réalistes.

Le premier chapitre a introduit les notions de base nécessaires à la simulation des VANETs. Dans la première partie, un état de l'art général sur les réseaux sans fil a permis de montrer l'influence des couches basses du modèle OSI sur la simulation, ainsi que l'influence de la mobilité. Cette partie a prouvé la nécessité d'utiliser un modèle de mobilité réaliste, avec une couche physique réaliste, tous deux ensuite intégrés à un simulateur de réseaux. En effet, sans l'utilisation combinée de ces deux éléments, les simulations risquent fortement de donner des résultats erronés et très optimistes par rapport au monde réel. C'est un élément clef qui est validé par la suite tout au long des chapitres de la thèse. Dans la deuxième partie, plusieurs simulateurs de réseaux et plusieurs simulateurs de mobilité ont été présentés. Leurs avantages et inconvénients respectifs sont explicités. Les différentes spécificités de ces simulateurs par rapport au contexte des VANETs, notamment dans la compatibilité entre les simulateurs de mobilité et les simulateurs de réseaux Ad Hoc, sont illustrées. Pour atteindre les objectifs de la thèse, la dernière partie a détaillé les choix scientifiques effectués ainsi que les outils utilisés. Tout d'abord, l'objectif d'apporter du réalisme dans les simulations VANETs est réaffirmé, puis différentes techniques d'optimisation des performances des VANETs sont présentées, notamment la technique *cross-layer*. Enfin, au niveau des outils utilisés durant cette thèse, le simulateur de réseau NS-2 et le simulateur de mobilité VanetMobiSim ont été choisis. En revanche, la question du choix du modèle de propagation et de la couche physique n'est pas tranchée, et trouve une réponse dans le chapitre 2.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la première contribution de cette thèse : le développement d'une plate-forme VANET réaliste. Après avoir décrit précisément les différentes modélisations du canal de propagation des ondes existantes, nous avons pu conclure que les modèles présentés ne sont pas satisfaisants pour répondre aux besoins des VANETs. Nous avons donc proposé un modèle semi-déterministe appelé UM-CRT. Ce modèle combine les avantages du simulateur déterministe à tracé de rayons CRT et du modèle statistique géométrique SCME-UM. Il permet d'obtenir des résultats réalistes, grâce à l'apport du simulateur déterministe, avec un temps de calcul raisonnable, grâce au modèle statistique. Nous avons ensuite proposé une couche physique réaliste. Celle-ci se compose de notre modèle UM-CRT et des normes de transmission IEEE 802.11p et IEEE 802.11n pour respectivement, des configurations de canal SISO et MIMO. L'ensemble que constitue chacune de ces couches physiques a ensuite été intégré dans le simulateur de réseau NS-2 pour former notre plate-forme VANET. Une fois l'outil de simulation mis en place, la validité et la précision de la plate-forme de simulation ont été montrées grâce à un comparatif, entre la couche physique purement déterministe, basée sur CRT, et notre couche physique semi-déterministe, basée sur UM-CRT. Ce chapitre se termine par une analyse des performances dans différentes configurations. La conclusion de l'analyse est que le modèle est adapté à la simulation des réseaux VANETs et que les objectifs de gain de temps de calcul et de conservation de la fiabilité des résultats par rapport à un modèle déterministe sont atteints.

Dans le troisième et dernier chapitre nous avons étudié plusieurs mécanismes permettant d'améliorer les performances des réseaux VANETs. Il a présenté la notion de qualité de service, montré que l'optimisation des performances des réseaux VANETs est une étape essentielle pour le domaine. En effet, la forte mobilité générée par les nœuds des réseaux VANETs engendrent de nombreux problèmes de communication (notamment des ruptures de liens). Ensuite, une étude des protocoles de routage topologiques a été menée, car les conclusions précédemment établies à leur sujet demandent à être validées via une plateforme de simulation réaliste VANET. Cette étude a montré que les protocoles réactifs sont les plus performants, et a également mis en avant que les mécanismes de routage des réseaux Ad Hoc classiques ne donnent pas de résultats satisfaisants. Cette constatation s'explique par le fait que les ruptures de lien, et donc de route, constituent le facteur majeur de perte de QoS dans les VANETs. Donc, pour obtenir des performances intéressantes, c'est contre ce phénomène que doit lutter le protocole de routage. Seuls les protocoles réactifs sont capables de le faire de manière efficace dans un contexte VANETs. L'étude s'est poursuivie avec l'analyse de AOMDV et DYMO, protocoles réactifs ayant des mécanismes plus adaptés aux contraintes topologiques. On a constaté que AOMDV permet de réduire le taux de paquets de routage et que DYMO offre une amélioration du temps de transmission significative, mais aucun d'eux ne constitue une réponse tout à fait adaptée à l'ensemble des situations des VANETs. Différentes optimisations sont ensuite proposées afin d'améliorer les performances, notamment les techniques dites *tuning* et *cross-layer*. Leurs résultats ont montré que la technique *tuning* permet une amélioration du taux de paquets reçus. Enfin, l'amélioration des performances des VANETs due à la technique MIMO est détaillée. Cette technique a montré de réelles améliorations des performances pour l'ensemble des mesures, et ceci quelle que soit la configuration de simulation. L'ensemble des résultats présentés dans le chapitre ont confirmé également que les performances obtenues en conditions réalistes restent faibles par rapport à des conditions plus simplistes, quelles que soient les techniques utilisées.

Perspectives

Les perspectives de ce travail de thèse sont multiples et concernent les deux contributions présentées.

Tout d'abord, le modèle de couche physique réaliste intégré dans la plateforme VANET doit être validé par la mesure. Des expérimentations ont été réalisées, conjointement entre les laboratoires MIPS-GRTC et XLIM-SIC en novembre 2011, pour aller dans ce sens. Les résultats obtenus à partir de ces mesures sont actuellement en cours d'analyse, et devraient permettre à terme de comparer les résultats des simulations, aux résultats des mesures. Enfin, un modèle purement statistique pourra être déterminé à partir des mesures effectuées, et ensuite comparé au modèle déterministe, au modèle semi-déterministe et finalement aux mesures elle-mêmes.

Ensuite, la plateforme actuelle utilise le simulateur NS-2. L'utilisation de notre couche physique sur d'autres simulateurs de réseaux est également une perspective, notamment le simulateur NS-3. En effet, celui-ci dispose de plusieurs outils qui n'existent pas sur NS-2. Il dispose également de mécanismes de simulation qui sont équivalents à la réalité et il permet d'émuler l'une ou l'autre des couches du modèle OSI. En combinant NS-3 avec notre couche physique, voire avec les résultats de mesure, il devient possible de réaliser une

plate-forme VANET multi-usage permettant de tester, au besoin, des améliorations de performances aux niveau physique, réseau, ou même à d'autres niveaux. Il est également envisagé de comparer notre modèle semi-déterministe réaliste à d'autres modèles, comme par exemple le modèle PhySimWifi développé par le « Karlsruhe Institute of Technology » (KIT) pour le simulateur NS-3.

Enfin, concernant les optimisations des performances dans les VANETs, les pistes sont très variées. Les travaux présents se sont focalisés sur la robustesse des liens et sur l'actualisation des mécanismes de routage. Nous avons constaté que les optimisations évaluées n'apportaient pas d'améliorations suffisamment importantes pour répondre de manière globale à la problématique de qualité de service dans les réseaux VANETs. Une première perspective complémentaire serait de se concentrer sur des métriques de probabilité de ruptures de routes, et de multiplier ou de mieux sélectionner les routes alternatives avec un mécanisme de réparation de route adapté. Enfin, l'expérience a montré que, pour obtenir des résultats optimaux, il ne faut pas se contenter d'une amélioration sur un seul niveau du modèle OSI : il faut utiliser conjointement les mécanismes d'amélioration à différents niveaux.

Revue internationale :

–A Semi-Deterministic Channel Model for VANETs Simulations; Ledy J., Boeglen H., Poussard A.-M., Hilt B., Vauzelle R. ; International Journal of Vehicular Technology 2012, IJVT 2012, États-Unis (2012)

Conférences internationales :

–AODV enhancements in a realistic VANET context; Ledy J., Hilt B., Boeglen H., Poussard A.-M., Vauzelle R.; The third IEEE Conference on Wireless Communications in Unusual and Confined Areas, ICWCUCA 2012, France (2012)

–Performance comparison of BER-based routing protocols under realistic conditions; Yélémou T., Ledy J., Hilt B., Poussard A.-M., Meseure P; .The 37th IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN 2011, Allemagne (2011)

–A Semi-Deterministic Channel Model for VANETs Simulations; Ledy J., Savadogo M., Boeglen H., Poussard A.-M., Hilt B., Vauzelle R;. Intelligent Transport Systems Telecommunications 2010, ITST 2010, Japon (2010)

–An Enhanced AODV Protocol for VANETs with Realistic Radio Propagation Model Validation; Ledy J., Boeglen H., Hilt B., Abouaissa H., Vauzelle R.; Intelligent Transport Systems Telecommunications 2009, ITST 2009, France (2009)

Conférences nationales :

–UM-CRT model optimisation; Bouhadi S., Ledy J., Poussard A.-M.; Journées Nationales des Communications dans les Transports Terrestres, JNCTT, France (2011)

–UM-CRT : Un modèle de canal semi-déterministe pour les VANETs; Ledy J., Boeglen H., Poussard A.-M., Hilt B., Vauzelle R.; 17e Journées Nationales Micro-ondes 2011, JNM 2011, France (2011)

Conférences invitées :

–Realistic wireless communication simulations for VANETS; Vauzelle R., Ledy J., Poussard A.-M., Boeglen H., Hilt B. ; The 4th Edition of Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2011, Roumanie (2011)

–A survey of V2V channel modeling for VANET simulations; Boeglen H., Hilt B., Lorenz P., Ledy J., Poussard A.-M., Vauzelle R.;The 8th International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services, WONS2011, Italie (2011)

Communication sans actes :

–Impact d'un modèle de propagation réaliste sur un protocole de routage pour les VANETS; Ledy J., Boeglen H., Abouaissa A., Hilt B., Vauzelle R.; GDR ONDES et GDR ISIS, France (2010)

Résumé

Cette thèse traite de l'optimisation des communications dans les réseaux véhiculaires à l'aide d'une plate-forme de simulation réaliste. Un environnement réaliste implique des modèles de mobilité adaptés aux véhicules ainsi que des modèles de couche physique détaillés (modèles de canaux et chaîne de transmission numérique).

Notre travail a d'abord consisté à concevoir une plate-forme de simulation réaliste dédiée aux VANETs (Vehicular Ad hoc NETworks). Cette plate-forme a été complétée par un modèle de propagation semi-déterministe que nous avons conçu. L'avantage de ce modèle, appelé UM-CRT, est d'avoir un réalisme équivalent à un modèle déterministe tout en réduisant significativement le temps de calcul. Ce modèle a été validé par comparaison avec un simulateur déterministe à tracé de rayons.

Nous avons ensuite utilisé cette plate-forme pour évaluer des protocoles de routage. L'efficacité de ces différents protocoles ad hoc testés en conditions réalistes nous a permis de focaliser notre étude sur les protocoles réactifs. De cette évaluation, nous avons retenu AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) auquel nous avons notamment appliqué une métrique cross layer pour pallier la baisse de performance induite par le réalisme. Nous avons ensuite utilisé une technique de tuning appliquée à des protocoles réactifs. Finalement, nous avons évalué différentes couches physiques, SISO (Simple Input Simple Output) et MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Ces travaux montrent que seules des améliorations combinées à différents niveaux (physique et réseau) permettraient d'apporter une amélioration significative des performances.

Mots clefs : VANETs, Simulation, Modèle de couche-physique, Protocoles de routage.

Abstract

This thesis deals with the optimization of communications in vehicular networks by using a realistic simulation platform. A realistic environment implies the usage of mobility models adapted to vehicles and also highly detailed physical models (channel models and digital transmission chain).

The first part of our work has consisted in the design of a realistic simulation platform dedicated to VANETs (Vehicular Ad hoc NETworks). This platform has been completed by a semi-deterministic propagation model which we have designed. This model called UM-CRT has the advantage to have the same level of realism than a deterministic model while requiring much less computation time. This model has been validated by comparison with a deterministic ray tracing simulator.

We then have used this platform to evaluate routing protocols. The efficiency of different ad hoc routing protocols in realistic conditions has led us to focus our study on the family of reactive protocols. From this evaluation we have selected AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) to which we have applied a cross-layer metric in order to reduce the performance degradation caused by the realistic environment. We then have used a tuning technique with reactive protocols. Finally, we have evaluated several SISO and MIMO physical layers. This work shows that only improvements combined at different levels (physical and network) can yield a significant increase in performance.

Keywords : VANETs, Simulation, Channel modeling, Routing protocols.