# Modèles et Simulations pour la Conception et l'Evaluation de Systèmes de Communication dédiés aux Transports

Patrick Sondi

▶ **To cite this version:**

Patrick Sondi. Modèles et Simulations pour la Conception et l'Evaluation de Systèmes de Communication dédiés aux Transports. Informatique [cs]. Université du Littoral Côte d'Opale, 2020. tel-03104349

**HAL Id: tel-03104349**
**https://hal.science/tel-03104349**

Submitted on 8 Jan 2021

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

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

# THÈSE

présentée en vue de l'obtention d'une

Habilitation à Diriger des Recherches

en

*Informatique*

par

**Patrick SONDI OBWANG**

---

# Modèles et Simulations pour la Conception et l'Evaluation de Systèmes de Communication dédiés aux Transports

---

Discutée le 12 novembre 2020 avec le jury :

| | | |
|---|---|---|
| **Rapporteur** | Pr. Véronique VEQUE | Univ. Paris Saclay, FR |
| **Rapporteur** | D.R. Simon COLLART-DUTILLEUL | Univ. Gustave Eiffel, FR |
| **Rapporteur** | D.R. Nathalie MITTON | INRIA, FR |
| **Examinateur** | Pr. Pierre MANNEBACK | UMons, BE |
| **Examinateur** | Dr. Marina AGUADO CASTRILLO | UPV/EHU, ES |
| **Promoteur** | Pr. Eric RAMAT | Univ. Littoral, FR |

Thèse préparée au Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Cote d'Opale (LISIC)
Université du Littoral Côte d'Opale

.

# Résumé

Ce mémoire retrace les recherches que j'ai menées depuis 2011 en tant qu'ATER à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, désormais Université Polytechnique des Hauts-de-France, puis en tant que postdoctorant à l'IFSTTAR, désormais Université Gustave Eiffel, et enfin depuis 2013 en tant que Maître de Conférences à l'Université du Littoral Côte d'Opale.

Elles s'inscrivent dans les domaines des protocoles de communication et de la modélisation des systèmes complexes d'objets communicants. En particulier, mes travaux portent sur la modélisation des composants et phénomènes qui sont impliqués dans les communications ou qui les affectent. La principale motivation de mes travaux est de rechercher les corrélations entre l'organisation des communications et les performances observées dans différents scénarios, afin d'améliorer la conception et l'évaluation des protocoles de communication.

La première partie de ce manuscrit porte sur les travaux menés pour évoluer vers des communications plus sûres dans les transports terrestres. Le chapitre 1 présente l'approche que j'ai développée pour améliorer l'évaluation des technologies envisagées dans les infrastructures de communication dédiées au transport ferroviaire grâce à la cosimulation entre un simulateur de trafic ferroviaire et un simulateur de réseaux de communications. Le chapitre 2 aborde la difficulté de déployer une infrastructure dédiée sur toutes les routes et présente la solution développée dans une thèse que j'ai co-encadrée pour organiser des communications véhicule-à-véhicule à grande échelle. Au chapitre 3, partant d'un constat sur le rôle crucial des communications dans les transports du futur, notamment avec le véhicule autonome, je présente les travaux de thèse que j'ai co-encadrés sur une approche couplant modélisation formelle et simulation à événements discrets dans la conception et l'évaluation des protocoles de communication.

La seconde partie présente mon parcours académique, mes activités d'encadrement, d'administration, de diffusion et de valorisation de la recherche, ainsi que mes enseignements, responsabilités pédagogiques et collectives au sein de différents établissements qui m'ont accueilli et ceux avec lesquels j'ai pu collaborer jusqu'à ce jour.

# Abstract

This manuscript reports my research activities over the last decade. First, in 2011 as a Temporary Assistant Lecturer and Researcher (ATER) at the former University of Valenciennes and Hainaut-Cambrésis (UVHC), now called Université Polytechnique des Hauts-de-France ; then as a Postdoctoral Researcher at the former Institut Français des Sciences et Technologies pour les Transports, l'Aménagement et les Réseaux (IFSTTAR), now called Université Gustave Eiffel, the same year ; and finally as an Associate Professor at the Université du Littoral Côte d'Opale, which is my current position since 2013.

These research activities cover the domains of communication protocol engineering and complex systems of communicating components modelling and simulation. Especially, I focus on the modelling of both the components and the phenomena involved during the communications, and which may affect their performance. The main goal of my research work is to find the correlations between a given organization of the communications imposed by a protocol, and the performance observed in various realistic scenarios of the targeted system, in order to improve both the design and the evaluation guidelines of communication protocols.

The first part of this manuscrit reports my contributions towards safer communications in land transportation systems. Chapter 1 presents the approach that I developed in order to improve the evaluation process of wireless technologies that are envisaged for rail traffic management systems. The concepts developed and the resulting virtual laboratory based on cosimulation between a rail traffic simulator and a network simulator are detailed. It is obvious that infrastructure networks cannot be deployed everywhere, at least for profitability reasons. Therefore, chapter 2 describes a self-organizing clustering scheme for routing protocols based only on vehicle-to-vehicle communications, that was developed in Phd research work that I co-supervised. In chapter 3, I highlight the critical role played henceforth by the communications in intelligent transportation systems, and claim that more rigorous design approaches that are usually imposed to the safety components of transport systems, also apply to communication protocols in this context. To that end, I present the design approach based on formal modelling and discrete event system specification that we developed in a Phd work that I supervised.

The second part of this manuscript reports my academic background, my research supervision activities, projects, publications and patents. My teaching activities, including courses, student supervision, administrative tasks in the different Institutions that I attended are also presented.

# Remerciements

*Je remercie Dieu.*

*Je remercie ma famille.*
*A mes enfants, Elisa et Noé, et à mon épouse Magali, je témoigne toute mon affection et toute ma gratitude pour leur soutien et leur patience dans ces moments qu'ils ont dû trop partager, bon gré parfois, mal gré plus souvent, avec Cortex, l'avatar de tous les ordinateurs que j'ai eus depuis le Doctorat.*
*A papa là-haut et à maman ici-bas avec Carla, Marceline et ses filles, Blaise et Christian. Un grand merci les Sondi.*

*Je remercie Eric Ramat.*
*Pour son accueil, ses encouragements, la confiance et le respect qu'il a témoignés à mes choix dans la conduite de mes recherches, son accompagnement dans la direction de mes sujets de thèse, ainsi que sa patience, il en faut toujours avec moi, je sais. Merci d'avoir accepté d'être mon promoteur.*

*Je remercie les membres de mon jury.*
*Je tiens à remercier Véronique Vèque, Nathalie Mitton et Simon Collart-Dutilleul pour avoir accepté de rapporter mon manuscrit. Merci pour vos remarques qui m'ont permis d'améliorer la structure de mon texte, de rectifier des imprécisions et d'avoir un autre regard sur mon travail.*
*Je remercie également Marina Aguado-Castrillo et Pierre Manneback qui ont promptement accepté, depuis l'étranger, de participer à mon jury malgré les incertitudes de cette période de covid.*
*Je suis honoré par votre participation à tous à ma soutenance.*

*Je remercie mes collègues.*
*Martine Wahl et Marion Berbineau de l'Université Gustave Eiffel, Dhavy Gantsou et Sylvain Lecomte de l'UVHC, Ouafae Cohin du CEA, Jean-Marc Llorens, Virginie Marion, Christophe Renaud et Sébastien Verel de l'ULCO, ainsi que mes doctorants Lucas Rivoirard, Emna Chebbi, Sabrine Belmekki et Valentin Mullet : merci à tous !*

*Je remercie mes ami.e.s.*
*Pas besoin de vous citer, vous savez au fond de vous que avez toujours été là.*

*A tous ceux qui ont eu un jour une pensée, une parole ou une action en faveur de mes recherches : merci !*

# Table des matières

**Introduction générale** **15**

**I Vers des communications plus sûres dans les transports terrestres** **19**

**1 Laboratoire virtuel pour les communications train-infra** **21**
1.1 Introduction . . . . . 21
1.2 Le système européen de gestion du trafic ferroviaire ERTMS . . . . . 23
1.3 Enjeux autour de la conception et de l'évaluation de l'ERTMS . . . . . 24
1.3.1 ETCS : le sous-système fonctionnel de l'ERTMS . . . . . 25
1.3.2 Le sous-système télécommunication de l'ERTMS . . . . . 26
1.3.3 Discussions sur les évaluations des sous-systèmes de l'ERTMS . . . . 29
1.4 Laboratoire virtuel basé sur la cosimulation pour l'ERTMS . . . . . 32
1.4.1 L'approche cosimulation . . . . . 32
1.4.2 Le scénario : concept et implémentation . . . . . 33
1.4.3 Le laboratoire virtuel . . . . . 35
1.5 Conclusion et perspectives . . . . . 38
1.5.1 Discussions et conclusion . . . . . 38
1.5.2 Perspectives . . . . . 39

**2 Modèle d'auto-organisation pour les communications V2V** **41**
2.1 Conception d'une infrastructure virtuelle pour la route . . . . . 43
2.1.1 Idée et approche . . . . . 43
2.1.2 Présentation de Chain-Branch-Leaf . . . . . 46
2.1.3 Modélisation de *Chain Branch Leaf* (CBL) dans OLSR : CBL-OLSR 53
2.1.4 Synthèse sur l'infrastructure virtuelle réalisée par CBL . . . . . 56
2.2 Modèles et simulation pour l'évaluation des communications . . . . . 57
2.2.1 Approches d'évaluation . . . . . 58
2.2.2 Outils de simulation . . . . . 58
2.2.3 Modélisation de la mobilité, des transmissions et des applications . . 60
2.3 Evaluation de CBL-OLSR et principaux résultats . . . . . 73
2.3.1 Evaluation structurelle comparative de CBL-OLSR et MPR-OLSR . 73
2.3.2 Evaluation système de CBL-OLSR . . . . . 77
2.3.3 Performance de CBL pour quelques applications coopératives . . . . 80
2.4 Conclusions et perspectives . . . . . 83

2.4.1 Conclusions . . . 83
2.4.2 Perspectives . . . 84

**3 Approche mixte modélisation formelle/simulation DEVS 87**
3.1 Introduction . . . 87
3.2 Description de l'approche modélisation formelle/simulation . . . 88
3.2.1 L'apport des méthodes formelles . . . 88
3.2.2 L'approche proposée . . . 89
3.3 Mise en oeuvre de l'approche proposée . . . 91
3.3.1 Modèle DEVS du VANET et du protocole . . . 91
3.3.2 Modèle formel du protocole CBL-OLSR dans un VANET . . . 92
3.4 Conclusion et perspectives . . . 95
3.4.1 Conclusion . . . 95
3.4.2 Perspectives . . . 95

**II Mémoires de parcours 97**

**A Parcours 99**
A.1 Informations personnelles . . . 99
A.2 Parcours professionnel . . . 99
A.3 Formation universitaire . . . 100
A.4 Formations pédagogiques . . . 100
A.5 Activités scientifiques . . . 100
A.5.1 De la thèse au LISIC (2010-2013) . . . 101
A.5.2 Activités scientifiques au LISIC (2013 à ce jour) . . . 102
A.6 Encadrement doctoral et scientifique (15) . . . 105
A.6.1 Encadrement de thèses de doctorat (4) . . . 105
A.6.2 Encadrement de postdoctorants (2) . . . 106
A.6.3 Encadrement de stages de Master (9) . . . 106
A.7 Responsabilités scientifiques (5 projets) . . . 107
A.8 Valorisation, rayonnement et diffusion . . . 108
A.8.1 Valorisations . . . 108
A.8.2 Rayonnement . . . 109
A.8.3 Diffusion . . . 109
A.9 Enseignements . . . 109
A.9.1 Liste de modules enseignés . . . 110
A.9.2 Charges annuelles de service . . . 110
A.10 Responsabilités pédagogiques et collectives . . . 111

**B Publications 113**
B.1 Chapitre d'ouvrage . . . 113
B.2 Revues internationales avec comité de lecture . . . 113
B.3 Conférences internationales avec actes et comité de lecture . . . 114
B.4 Workshops internationaux avec actes et comité de lecture . . . 115
B.5 Congrès nationaux avec actes et comité de lecture . . . 116

**Conclusion et perspectives générales 117**

**Références bibliographiques 132**

# Table des figures


1.1 Niveaux d'opération de l'ETCS . . . . . 24
1.2 Le sous-système de télécommunication GSM-R . . . . . 27
1.3 Exigences de QoS de l'ERTMS sur le GSM-R . . . . . 28
1.4 Concept de scénario en cosimulation . . . . . 33
1.5 Construction de scénario à partir de traces réelles . . . . . 34
1.6 Architecture du laboratoire virtuel . . . . . 35
1.7 Modélisation dans OPNET d'un scénario ERTMS . . . . . 36
1.8 Synchronisation des messages en cosimulation . . . . . 37

2.1 Modes de communication supportés par le protocole GeoNetworking . . . . 45
(a) Point à point . . . . . 45
(b) Point à multi-points . . . . . 45
(c) GeoAnycast . . . . . 45
(d) GeoBroadcast . . . . . 45
2.2 Illustration sur une autoroute à trois voies d'un groupe de véhicules . . . . 46
2.3 Illustration de la création d'une chaîne dans un cas autoroutier . . . . . 47
2.4 Temps de connexion $CT$ en fonction de la vitesse relative et de la portée de transmission [1] . . . . . 49
(a) Cas de deux véhicules en sens opposé de circulation . . . . . 49
(b) Cas de deux véhicules dans le même sens de circulation . . . . . 49
2.5 Illustration de la stabilité accrue de CBL grâce au paramètre *ChainTime* . 50
(a) Durée moyenne d'un noeud dans le statut de noeud branche . . . . . 50
(b) Durée moyenne de rattachement d'un noeud feuille au même noeud branche . . . . . 50
2.6 Procédure utilisée lors de la réception d'un message HELLO [1] . . . . . 51
2.7 Impact, observé via Ms1, des coefficients pondérateurs sur la structure CBL pour le scénario S5 cas A avec CBL-OLSR . . . . . 52
2.8 Durée cumulée pour chaque valeur de nombre de chaînes observée dans le VANET . . . . . 53
(a) CBL_v1 . . . . . 53
(b) CBL_v2 . . . . . 53
2.9 Nœuds et liens fonctionnels de CBL . . . . . 55
2.10 Modélisations nécessaires à l'étude des performances du schéma CBL . . . . 58
2.11 Diagramme d'utilisation de MATLAB . . . . . 60

2.12 Différentes cartes générées par les modèles de type *Street*-RWP . . . . . 61
(a) Carte du type Manhattan . . . . . 61
(b) Carte aléatoire . . . . . 61
(c) Carte issue du monde réel . . . . . 61
2.13 Réseau A27 importé dans Netedit . . . . . 64
2.14 Densité de probabilité de la vitesse désirée pour les VL et les PL . . . . . 64
2.15 Puissance mesurée en environnement autoroutier et modèles associés . . . . 67
2.16 Puissance moyenne reçue pour le modèle LOS/OLOS et le modèle Nakagami 69
2.17 Taxonomie des applications ITS dans les VANETs . . . . . 70
2.18 Ordonnancement temporel des actions de sécurité dans les ITS . . . . . 70
2.19 Structures réalisées par MPR et CBL dans le scenario S5 à la date T=500s [2] . . . . . 75
(a) Etat des connexions entre les noeuds du VANET et leurs noeuds MPR (focus sur un noeud particulier) . . . . . 75
(b) Etat des connexions dans la structure créée par CBL, une chaîne dans chaque sens de circulation . . . . . 75
2.20 Nombre de chaînes dans le temps et durées accumulées associées (scenario 3) [2] . . . . . 76
2.21 Noeuds branche par chaîne (Ms3) et relais impliqués dans un broadcast (Ms7/Ms13) dans le scenario 3 [2] . . . . . 76
(a) noeuds branche par chaîne . . . . . 76
(b) nombre de relais impliqués dans un broadcast . . . . . 76
2.22 Durées d'un noeud en tant que relais (Ms6/Ms12) et de rattachement noeud-relais (Ms7/Ms13) du scenario 3 [2] . . . . . 77
(a) durée relais . . . . . 77
(b) durée rattachement noeud à relais . . . . . 77
2.23 Comparaison des trafics des messages HELLO et TC dans le scénario S5 . . 79
(a) trafic des messages HELLO . . . . . 79
(b) trafic des messages TC . . . . . 79
2.24 Comparaison des trafics des messages HELLO et TC dans le scénario S10 . 79
(a) trafic des messages HELLO . . . . . 79
(b) trafic des messages TC . . . . . 79
2.25 Average of traffic dropped and the WLAN delay (20 sources) . . . . . 82
(a) WLAN Data Dropped (Retry Threshold Exceeded) . . . . . 82
(b) WLAN Data Dropped (Buffer Overflow) . . . . . 82
(c) IP Traffic Dropped . . . . . 82
(d) WLAN Delay . . . . . 82
2.26 Taux de réception de paquet et délai IP pour deux applications coopératives en présence d'autres trafics [3] . . . . . 83
(a) Packet Delivery Ratio for collective perception . . . . . 83
(b) IP delay for cooperative localization . . . . . 83

3.1 Principales phases de l'approche modélisation formelle/simulation DEVS [4] 90
3.2 Modèle DEVS du VANET dans VLE . . . . . 91
3.3 Evolution du nombre des noeuds branche et feuille dans la simulation [5] . . 92
3.4 Overview of the CBL-OLSR formal model in Event-B : contexts and machines [6] . . . . . 93

# Liste des tableaux


2.1 Modification pour CBL du “message type” défini dans le protocole OLSR . 55
2.2 Codage de la table des voisins à un saut d'un nœud . . . . . 56
2.3 Simulateurs de communication utilisés dans la littérature . . . . . 59
2.4 Simulateur de trafic routier microscopique utilisés dans la littérature . . . . 62
2.5 Paramètres utilisés pour le modèle Krauß pour les Véhicules légers (VL) et Poids lourds (PL) . . . . . 64
2.6 Définition des scénarios et de la valeur de la demande de trafic routier . . . 65
2.7 Scénarios et valeurs de densité de trafic . . . . . 65
2.8 Nombre de nœuds nécessaires à chaque scénario sous Riverbed OPNET Modeler . . . . . 65
2.9 Modélisation de la propagation des signaux dans les VANETs . . . . . 67
2.10 Configuration des nœuds dans OPNET . . . . . 68
2.11 Valeur des paramètres de la couche MAC du protocole 802.11p . . . . . 69
2.12 Besoins en communication des applications de sécurité véhiculaires . . . . . 72
2.13 Valeurs moyennes des résultats dans tous les scénarios pour CBL-OLSR et MPR-OLSR . . . . . 74
2.14 Paramètres des protocoles *Optimized Link State Routing protocol* (OLSR) et *Chain Branch Leaf - Optimized Link State Routing protocol* (CBL-OLSR) pour deux ensembles, cas A et cas B, d'intervalles temporels . . . . . 78
2.15 Moyennes des métriques Mr1 à Mr7 sous OPNET – Scénarios S1 à S3 cas A, CBL-OLSR, modèle de propagation OLOS . . . . . 81

3.1 Proof Statistics. . . . . 95

# Introduction générale

A l'aube de deux innovations déterminantes qui vont révolutionner les communications dans les systèmes de transport du futur, le moment m'a paru idéal pour présenter une synthèse de mes travaux de recherche menés sur les dix dernières années, depuis l'obtention de mon doctorat en 2010.

La première innovation est le véhicule complètement autonome équipé d'un ordinateur de bord hyperconnecté et dont l'arrivée sur les routes est annoncée dans un futur proche. Initié dans les années 70 pour le transport collectif guidé, notamment avec le métro de type VAL né ici-même dans les Hauts-de-France, le recours aux communications et à l'automatisation de la conduite s'est progressivement étendu et amplifié dans les transports terrestres. On note par exemple l'arrivée dans les années 2000 des communications mobiles (GSM-R) dans le système européen de gestion de trafic ferroviaire (ERTMS) qui a permis d'harmoniser et de fluidifier la circulation des trains à grande vitesse à travers l'Europe. Les progrès réalisés dans l'automatisation et la localisation permettent notamment à la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) d'annoncer le train de fret autonome d'ici fin 2021. En outre, les applications d'aide à la conduite, initialement proposées aux automobilistes à travers des boîtiers non connectés (Navigation - TomTom, signalements des dangers - Coyote, etc), ont évolué vers des versions connectées disponibles sur smartphones (Waze, etc) avant d'être complètement intégrées dans les ordinateurs de bord désormais connectés de véhicules, y compris dans leurs versions coopératives (Car2X, Car2Car, etc). Parallèlement à cette connectivité croissante, l'amélioration des systèmes de détection et des systèmes de pilotage autonome ont permis de parfaire l'automatisation de la conduite pour atteindre les niveaux observés actuellement. Dans cette perspective d'automatisation complète de la conduite, les considérations liées à la sûreté sont accrues et, par conséquent, elles doivent s'appliquer inéluctablement au système de communication qui joue un rôle crucial dans le fonctionnement de plusieurs applications véhiculaires.

La seconde innovation est la technologie 5G dont les fréquences ont été mises aux enchères en France au moment de la rédaction de ce manuscrit. Elle parachève la convergence des communications, notamment en intégrant l'Internet des objets (IoT) à la longue liste de terminaux déjà rassemblés par la 4G via le tout-IP. Au niveau des accès, la 5G assimile tous les modes de communications, notamment ceux concernant les véhicules, à savoir véhicule-à-infrastructure (V2I) et véhicule-à-véhicule (V2V), tout en offrant une latence faible et bien d'autres performances à des niveaux largement adaptés aux communications véhiculaires. Au niveau de l'organisation de l'accès et du coeur de réseau, la 5G intègre

la plupart des innovations récentes, découlant notamment de la diversification des accès (Cloud Radio Access Network – C-RAN), de la softwarisation (Software Defined Radio – SDR et Software Defined Network – SDN) et la virtualisation des fonctions relatives aux réseaux (Network Function Virtualization – NFV). Associée à des paradigmes tels que le Edge computing, le Fog computing et le Named Data Networking (NDN), la 5G devrait permettre un accès plus rapide aux données au plus près de leur utilisation, ce qui représente un avantage certain pour les applications véhiculaires. Cette variété d'applications très large augure que la 5G peut s'imposer à terme comme le système de communication mobile pour toutes les applications de la ville intelligente, et par conséquent pour les communications dans les systèmes de transports terrestres.

En particulier, dans le contexte du transport ferroviaire, la question du système de communication futur se pose de manière plus urgente du fait de l'obsolescence et de la fin de maintenance annoncée de la technologie GSM-R. Cette problématique était déjà d'actualité à mon arrivée en 2011 à l'Institut Français des Sciences et Technologies pour les Transports, l'Aménagement et les Réseaux (IFSTTAR), aujourd'hui Université Gustave Eiffel, pour un séjour postdoctoral après ma thèse de doctorat. L'adoption du GSM-R avait été validée à la suite de plusieurs années de campagnes de mesures et de tests sur site qui ne peuvent pas être reproduites de nos jours pour des raisons de coût. Mes travaux de recherche dans ce contexte ont consisté à développer un laboratoire virtuel pour réaliser des évaluations par simulation des technologies de communications alternatives au GSM-R. L'approche développée repose sur la cosimulation entre un simulateur de trafic ferroviaire qui implémente tous les éléments du contexte ferroviaire susceptibles d'affecter les communications (voies, mouvements de trains, trafic échangé, etc) et un simulateur de réseaux permettant de modéliser toutes les fonctions d'une technologie de télécommunication de la couche physique aux protocoles de la couche application. Les concepts et les mécanismes proposés sont présentés au chapitre 1 de la première partie, ainsi que les principaux résultats obtenus.

Le problème s'est posé différement pour le transport routier où l'absence d'infrastructure dédiée déjà déployée à grande échelle, contrairement au ferroviaire, laissait toutes les options encore ouvertes. Dans ce contexte, anticipant sur une mutualisation future des infrastructures de communications pour tous les transports terrestres, autour de la 5G en l'occurence, je me suis précisément intéressé à l'organisation des communications entre les véhicules dans les zones dépourvues de toute couverture par infrastructure pour assurer la continuïté des applications coopératives. Fort d'une expérience développée durant ma thèse de doctorat sur la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc, j'ai co-encadré une thèse de doctorat sur un modèle d'auto-organisation pour les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules. Les travaux de cette thèse menée entre 2015 et 2018 en collaboration avec l'IFSTTAR, alors que j'étais déjà Maître de Conférences à l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO) depuis 2013, sont résumés au chapitre 2. Le modèle d'organisation proposé réalise, dans chaque sens de circulation sur route, une structure de dorsale (chaîne) reliant des cluster-heads (dits branches) auxquels se rattachent certains de leurs voisins directs (dits feuilles). Il optimise ainsi la diffusion de messages de broadcast et permet de réaliser des communications soit uniquement dans le cluster, plutôt uniquement en amont ou au contraire en aval du trafic. Le modèle ainsi que les algorithmes proposés sont évalués par simulation par rapport aux approches de routage classiques dans les réseaux ad hoc et les résultats obtenus dans divers contextes autoroutiers et pour diverses applications coopératives sont également présentés.

Dans ces derniers travaux, la conception du modèle d'auto-organisation a été guidée par les besoins fonctionnels des applications coopératives par rapport aux communications. Les évaluations par simulation proposées ont quant à elles été menées essentiellement sur les performances à la fois de la structuration réalisée, ainsi que par rapport aux métriques usuelles (débit, délais, taux de perte, etc). En revanche, ainsi que je l'ai souligné ci-avant à propos de l'automatisation complète future de la conduite, il est impératif que les communications, qui jouent un rôle de plus en plus crucial, soient également soumis à des évaluations rigoureuses habituellement appliquées aux systèmes impliqués dans des domaines sensibles à la sûreté tels que les transports. L'idée est de pouvoir, en plus de la performance, exprimer et vérifier un certain nombre de propriétés sur les protocoles de communications mis en oeuvre dans un système de transport, voire sur l'ensemble de ce dernier, dans ce contexte. J'ai ainsi amorcé en 2016, parallèlement à la thèse précédente sur le modèle d'auto-organisation, l'encadrement d'une thèse sur une approche couplant modélisation formelle et simulation à événements discrets pour la conception et l'évaluation de protocoles de communications sûrs pour les transports. Les travaux et résultats obtenus dans le cadre de cette thèse soutenue en 2019 sont présentés au chapitre 3 de la première partie du présent manuscrit.

La seconde partie de ce mansucrit présente mon parcours académique ainsi que les formations que j'ai suivies pour me préparer à mes activités de recherche et d'enseignement. J'y présente également mes activités en matière d'encadrement, d'administration, de valorisation, de relecture critique et d'animation de la recherche. Les projets de recherche que j'ai initiés et dont j'assure la responsabilité scientifique sont également détaillés, ainsi que les financements que j'ai pu obtenir pour les mener à bien. Les modules que j'ai assurés en enseignement, mes charges de services annuelles, ainsi que mes responsabilités pédagogiques et collectives sont également décrits, juste avant la liste de mes publications depuis la thèse. Une conclusion générale et les perspectives ouvertes par mes travaux clôturent ce manuscrit.

# Première partie

# Vers des communications plus sûres dans les transports terrestres

# 1

# Laboratoire virtuel pour les communications train-infrastructure

**Sommaire**


**1.1 Introduction . . . . . 21**
**1.2 Le système européen de gestion du trafic ferroviaire ERTMS . . . . . 23**
**1.3 Enjeux autour de la conception et de l'évaluation de l'ERTMS . . . . . 24**
1.3.1 ETCS : le sous-système fonctionnel de l'ERTMS . . . . . 25
1.3.2 Le sous-système télécommunication de l'ERTMS . . . . . 26
1.3.3 Discussions sur les évaluations des sous-systèmes de l'ERTMS . . 29
**1.4 Laboratoire virtuel basé sur la cosimulation pour l'ERTMS . . . . . 32**
1.4.1 L'approche cosimulation . . . . . 32
1.4.2 Le scénario : concept et implémentation . . . . . 33
1.4.3 Le laboratoire virtuel . . . . . 35
**1.5 Conclusion et perspectives . . . . . 38**
1.5.1 Discussions et conclusion . . . . . 38
1.5.2 Perspectives . . . . . 39


## 1.1 Introduction

Les systèmes de communication pour les transports du futur devront très clairement intégrer à la fois le véhicule autonome et la possibilité de prendre en charge toutes les fonctionnalités essentielles pour le pilotage à distance d'un véhicule, y compris celui initialement conduit par un humain (par exemple en situation de détresse). L'infrastructure ferroviaire constitue le premier modèle de déploiement à grande échelle, comparativement au métro, d'un système de communication qui permet à court terme la mise en circulation de véhicules complètement autonomes dans les transports terrestres. Des tests sont prévus en 2021 déjà par SNCF Fret avec des trains complètement autonomes.

L'harmonisation, déjà entreprise au niveau européen entre les différents systèmes de gestion de trafic ferroviaire nationaux, accentue cette idée que le ferroviaire peut être le modèle d'appui idéal pour le développement des systèmes de communication pour l'ensemble des transports terrestres du futur en Europe. C'est un point d'appui qui doit être néanmoins observé à travers ses succès, mais aussi à travers ses écueils, tout en prenant en compte ses spécificités très particulières pour éviter des biais dans les conclusions à en tirer pour les systèmes futurs destinés à l'ensemble des transports terrestres. Pour ne mentionner que quelques-uns des aspects les plus importants, nous pouvons considérer :

- **Le caractère dédié de l'infrastructure ferroviaire** qui circonscrit actuellement à la fois le périmètre des investissements, l'investisseur et le bénéficiaire. La question se pose autrement concernant une infrastructure globale future pour tous les transports terrestres. Par exemple, même si cela peut arriver, aujourd'hui financer à perte le déploiement de stations de base GSM-R dans une zone blanche s'il y a un enjeu de sûreté pour quelques trains qui la traverse pose déjà question. Il n'est pas évident que dans le futur les opérateurs déploiraient une infrastructure analogue pour les automobilistes sur les routes situées dans des zones peu habitées où elle ne serait pas rentable. La conception d'une infrastructure globale devra aborder cet aspect.
- **L'hégémonie d'un opérateur ferroviaire par Etat qui facilite les décisions locales au sein de chaque Etat et l'harmonisation au niveau Européen**. En effet, chaque opérateur historique national impose en général ses choix technologiques au niveau de son Etat. De plus, il est plus facile d'aboutir à un consensus au niveau Européen avec un décideur par Etat plutôt que si chacun en compte plusieurs. La question se posera différemment pour une infrastructure globale qui va impliquer une multitude d'opérateurs des transports terrestres nationaux (ferroviaires, routiers, etc.), sans compter les opérateurs de télécommunication également concernés par tout déploiement d'infrastructure dans le domaine public. A ceux là, s'ajouteront de nombreux prestataires de services et une multitude de clients divers allant des services des Etats, en passant par des entreprises du secteur des transports dont les constructeurs automobiles, jusqu'à l'usager lambda du grand public. Cette multiplicité de partenaires décisionnaires conjuguée à la pression des attentes très variées des différents bénéficiaires aux profils hétérogènes augure que le processus d'harmonisation des choix technologiques et normatifs sera beaucoup plus complexe dans le cadre d'une infrastructure globale pour les transports du futur.
- **Une relative insensibilité imposée vis-à-vis des évolutions technologiques intermédiaires.** En effet, les investissements colossaux nécessaires à l'équipement des infrastructures ferroviaires à l'échelle européenne imposent d'une part que les technologies choisies soient suffisamment matures pour garantir leur pérénnité, et d'autre part qu'elles soient maintenues le plus longtemps possible dans le temps pour amortir les coûts. Par exemple, il est intéressant d'observer que le GSM-R continue à être déployé sur des lignes ferroviaires alors que la fin des maintenances sur la technologie GSM est déjà annoncée par les industriels. Pendant ce temps là, le grand public est passé par la 3G, puis la 4G et se prépare déjà à la 5G. Il faudra probablement attendre cette dernière technologie de rupture pour que le secteur ferroviaire entame de nouveaux investissements en Europe, alors que l'arrivée de la 3G et de la 4G s'est accompagnée systématiquement de nouvelles applications pour les automobilistes à travers les smartphones et les ordinateurs de bord des véhicules. Une infrastructure globale future aura probablement une sensibilité plus forte vis-à-vis des évolutions technologiques. Elle devra donc être conçue pour permettre une adaptation plus rapide.

A travers ce chapitre, je rends compte de mes travaux sur la modélisation et l'évaluation par simulation du système européen de gestion du trafic ferroviaire ERTMS (*European Rail Traffic Management System*). Amorcés dans le cadre d'une action spécifique pilotée par Marion Berbineau entre les deux laboratoires lillois de l'IFSTTAR (devenu entretemps Université Gustave Eiffel), ESTAS et LEOST, j'ai pu rejoindre ces travaux en déposant un projet de recherche au concours de bourses postdoctorales IFSTTAR en 2011. Ces travaux se sont poursuivis après le postdoctorat en 2012 dans le cadre du projet ANR VEGAS

que j'ai en partie rédigé, dans lequel j'ai impliqué l'ULCO lors de mon recrutement en 2013, et qui s'est achevé en 2016. Les détails sur le déroulement du projet en lui-même sont exposés en seconde partie de ce manuscrit. Ce chapitre se concentre sur les aspects scientifiques et techniques dans le but de mettre en évidence mes contributions dont les détails sont disponibles dans un ouvrage [7].

Par conséquent, la suite de ce chapitre est structurée comme suit. Dans un premier temps, je propose une description technique succincte de l'ERTMS ainsi que de ses deux principaux sous-systèmes, à savoir celui en charge du contrôle-commande et celui en charge des communications. Après un aperçu des enjeux liés à l'évaluation de l'ERTMS ainsi que des outils antérieurement proposés à cet effet, je décris l'approche et la solution que nous avons conçues et développées dans le cadre du projet ANR VEGAS. A la lumière de cette expérience et des spécificités du ferroviaire ci-avant évoquées, je propose enfin une discussion sur la manière dont ces travaux peuvent inspirer la conception et l'évaluation du système global futur pour les communications dans les transports terrestres.

## 1.2 Le système européen de gestion du trafic ferroviaire ERTMS

L'*International Union of Railway* (UIC) a mis en place l'ERTMS dans le but d'harmoniser les différents systèmes nationaux de contrôle du trafic ferroviaire avant l'ouverture totale à la concurrence du transport ferroviaire des biens et des marchandises à travers l'*Union Européenne* (UE). Afin de permettre une utilisation optimale des voies ferrées, cette harmonisation devait s'accompagner de mécanismes de gestion dynamique du trafic. Pour y parvenir, l'ERTMS s'appuie sur une supervision plus sûre du pilotage des trains, ainsi que sur un système de communication pouvant opérer de manière continue entre chaque train et le centre de gestion, y compris pour des trains circulant à grande vitesse. Les fonctionnalités mises en oeuvre pour atteindre ces objectifs peuvent être rattachées aux différents composants de l'ERTMS [8] dont les deux principaux sont :

- **le sous-système de télécommunication** qui assure les communications sans-fil entre chaque train et le centre de gestion. Il est implémenté grâce à une adaptation spécifique de la technologie GSM pour le ferroviaire, le GSM-R (*Global System for Mobile communications - Railway*).
- **le sous-système fonctionnel** qui assure la signalisation, la localisation et la supervision continues des trains depuis le centre de gestion grâce aux communications GSM-R, permettant ainsi une gestion dynamique du trafic. Il est identifié sous le sigle ETCS (*European Train Control System*)

Afin de permettre un déploiement progressif de l'ERTMS tout en assurant une supervision adaptée en fonction du niveau d'équipement des voies empruntées, trois niveaux d'opération de l'ETCS (fig. 1.1) ont été définis [9] :

- **le niveau 1** permet l'interopérabilité avec les voies non équipées en système de communication sans-fil. Les procédures qui y sont définies s'appuient encore fortement sur les signaux visuels et autres équipements situés sur les voies. Ce niveau rend possible la circulation des trains à travers les différents réseaux nationaux grâce à une signalisation ERTMS harmonisée. En revanche, il ne permet pas d'optimiser suffisamment la circulation des trains à grande vitesse, ces derniers étant contraints de ralentir à hauteur des signaux visuels, des fins de voies, des croisements de voies, etc.
- **le niveau 2** intègre un système de communication sans-fil qui assure les communications entre chaque train et le centre de gestion. C'est le niveau actuellement déjà

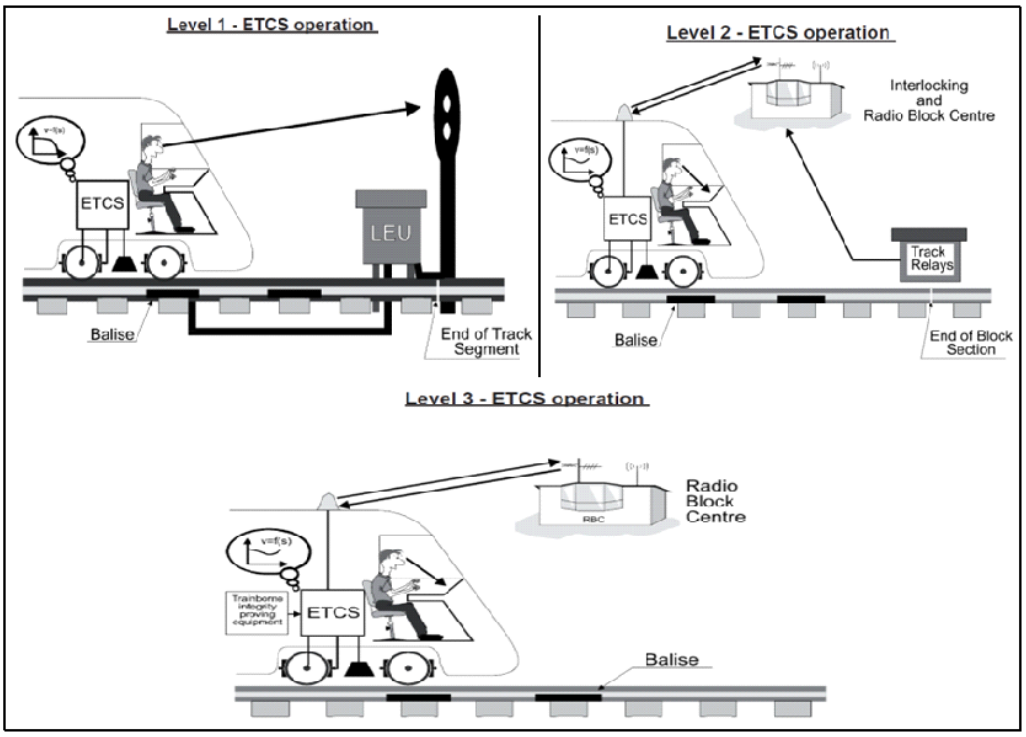



FIGURE 1.1 – Niveaux d'opération de l'ETCS - extrait de [9]

déployé ou en cours de déploiement sur les voies empruntées par les trains à grande vitesse. Il s'appuie sur des équipements déployés le long des voies essentiellement pour déterminer la localisation du train dans le réseau avant leur transmission au centre de gestion via le système de communication sans-fil. Ce niveau sera abordé plus en détail par la suite, car il est celui principalement concerné par nos contributions.

– **le niveau 3** vise à s'affranchir davantage des équipements sur les voies en s'appuyant notamment sur un système de localisation par satellite dont l'usage s'est fortement développé ces dernières années. Dans ce sens, l'arrivée du système de positionnement européen Galileo est un atout supplémentaire pour l'ERTMS. Plusieurs travaux [10] sont déjà en cours en perspective de l'évolution des infrastructures ferroviaires vers le niveau 3 de l'ETCS.

## 1.3 Enjeux autour de la conception et de l'évaluation de l'ERTMS

A partir de cette section, je focaliserai ma présentation sur le niveau 2 d'opération de l'ETCS qui comprend les deux sous-systèmes de l'ERTMS, à savoir celui de contrôle-commande (ETCS) et celui de télécommunication (actuellement le GSM-R). Le déploiement de l'ERTMS est déjà en soi un processus long et coûteux. Depuis les premières ébauches de l'ERTMS à la fin des années 80, il a fallu 10 ans pour aboutir aux premières spécifications vers les années 2000. Sur les 51000 km initialement prévus à équiper à l'horizon 2030, seulement 10% l'étaient effectivement fin 2016. Entre autres ces observations sur les retards de déploiement, un rapport de la Cour des comptes européenne [11] pointe d'autres difficultés notamment en matière de coûts (entre 100 k€ et 350 k€ par kilomètre juste pour l'équipement ERTMS et son installation) et de justification de certains investissements. J'inclus dans ces derniers le maintien du GSM-R en tant que technologie de communication dans les niveaux 2 et 3 d'opération d'ETCS, au vu de la fin annoncée des maintenances sur cette technologie à l'horizon 2025.

Néanmoins, l'ERTMS ayant été définitivement adopté et son déploiement étant déjà bien amorcé, l'apport de la recherche doit se focaliser sur l'accélération des déploiements en cours et la préparation des évolutions futures. Ce d'autant plus qu'ERTMS est en passe de devenir un standard mondial. La moitié des déploiements contractualisés sont en dehors de l'Europe (51%), soit 32% en Asie, 12% en Afrique et Moyen-Orient, 4% en Océanie et 1% en Amérique du Sud. Les contractualisations se sont poursuivies et elles atteignaient en 2019 un total de 105000 km de voies à équiper à travers le monde. Avant de détailler mon approche dans le cadre de cet apport, il convient de présenter les sous-systèmes précités et l'état des travaux au moment où je m'y suis intéressé.

### 1.3.1 ETCS : le sous-système fonctionnel de l'ERTMS

L'ETCS regroupe les applications impliquées dans la signalisation, la localisation et le contrôle-commande des trains. Il réalise les fonctions de l'ERTMS visant à remplir les trois objectifs suivants :

- **renforcer la sûreté par une supervision du pilotage des trains** : durant son déplacement, le train reçoit diverses informations dont des consignes régulant son mouvement (vitesse, distance, etc.) désignée par Movement Authority (MA). Cette dernière définit à chaque fois un point précis sur le parcours (End of Authority - EOA) que le train ne devra en aucun cas franchir, à moins d'avoir reçu une consigne différente entre-temps. Le système embarqué du train calcule les courbes d'accélérations et décélarations supervisant son mouvement jusqu'à ce point. Ce processus se repète à chaque réception de MA. Ainsi, un train qui ne reçoit plus de MA doit impérativement s'arrêter au niveau du dernier EOA reçu.
- **améliorer les performances par une augmentation de la vitesse et des capacités** : en recevant de manière continue des consignes de mouvement clairs via une interface, les conducteurs de train peuvent piloter en toute sécurité jusqu'au prochain EOA en respectant la vitesse limite et sans devoir guetter les signaux visuels le long de la voie. Ainsi, le centre de gestion peut transmettre des MA à tous les trains de manière à favoriser l'utilisation maximale des voies et réduire les temps d'occupation du réseau par chaque train en le faisant rouler à la vitesse maximale possible jusqu'à son prochain EOA. Au niveau 2 d'opération de l'ETCS, un système de communication mobile tel que le GSM-R permet au centre de gestion de recevoir la position du train quasi continuellement et de lui faire parvenir en retour le prochain MA.
- **garantir l'interopérabilité** : contrairement aux signaux visuels où les couleurs et symboles dépendent des régulations nationales, l'ETCS offre un cadre harmonisé où la consigne de mouvement parvient directement au conducteur du train sur son ordinateur de bord via le GSM-R, ce quelle que soit l'autorité de régulation dont dépendent les voies sur lesquelles il circule.

Les applications ETCS jouent un rôle crucial dans la sûreté et l'efficacité de la supervision du trafic ferroviaire. Par conséquent, leur conception et leur évaluation suivent un processus de validation rigoureux. En particulier, tout nouvel équipement candidat à une intégration dans l'ERTMS doit être certifié par l'un des laboratoires européens de référence. Jusqu'à la fin du projet VEGAS en 2017, il n'y en avait que trois en Europe, à savoir le CEDEX (Royaume-Uni), le DLR (Allemagne), MULTITEL (Belgique). Ce nombre restreint de centres pouvait allonger les délais de certifications, notamment lorsqu'un grand nombre d'équipements innovants étaient présentés. Les coûts des opérations de certification peuvent être également non négligeables, notamment lorsque le même produit doit

repasser plusieurs fois les tests avant d'obtenir la certification. Depuis lors, de nouveaux laboratoires de références ont vu le jour (le Laboratoire ERTMS France et RINA en Italie), ce qui résout les problèmes de délais pour le moment.

Un des principaux apports de la modélisation et de la simulation est de permettre des tests et évaluations rapides à faibles coûts durant la conception et l'évaluation avant d'engager un processus de certification. Concernant les applications ETCS, l'enjeu essentiel est de vérifier et garantir que la fonction assurée par une procédure de contrôle-commande ou un équipement est conforme aux spécifications ERTMS à la fois dans son périmètre et dans son impact sur le fonctionnement du système global. La modélisation formelle ainsi que les méthodes et outils formels sont particulièrement adaptés pour la validation des procédures de contrôle-commande et autres applications ETCS. Un recensement de la plupart des simulateurs et bancs d'essais pour l'ERTMS est proposé dans [12]. La plupart d'entre eux intègrent des fonctionnalités très avancées qui permettent de réaliser des simulations réalistes et robustes, notamment :

- des descriptions détaillées de voies ferroviaires avec leurs éléments (balises, signaux visuels, interlocking, etc.) ;
- des scénarios de circulation impliquant plusieurs trains ;
- des modèles d'équipements et d'applications ETCS (Euroradio, EVC - European Vital Computer, RBC - Radio Bloc Center, etc.) ;
- des interfaces de pilotage (DMI - Driver Machine Interface) permettant d'intégrer un opérateur humain dans une simulation interactive servant notamment à former des conducteurs ou analyser leur comportement en conduite ;
- des interfaces permettant de connecter des équipements physiques réels (EVC réel, RBC réel, etc.) à la simulation ;

Afin de garantir que les outils de tests se rapprochent le plus possible de la procédure de certification, les procédures et scénarios de tests que peuvent implémenter les simulateurs et bancs d'essai sont rigoureusement décrits dans le subset 026 [13]. Développé par ERSA France, fournisseur de solutions de tests et de simulation pour l'ERTMS, notamment aux trois laboratoires européens de référence et aujourd'hui filiale de CLEARSY, le simulateur ERTMS utilisé dans le cadre de mes recherches est conforme au subset 026. Il équipe notamment les laboratoires Lillois ESTAS et LEOST de l'IFSTTAR ainsi que le laboratoire Heudiasyc de l'UTC qui sont avec ERSA France et le LISIC les partenaires du projet ANR VEGAS durant lequel mes recherches ont été développées.

Etant l'un des plus complets disponibles, le simulateur ERTMS d'ERSA France implémente toutes les fonctionnalités mentionnées ci-dessus. Le DMI est conforme aux spécifications du CENELEC et permet à un conducteur humain de piloter manuellement un train en évoluant dans un environnement 3-D réaliste qui intègre les voies et tous les éléments de signalisation. En plus d'aider à la réalisation de tests, cette partie du simulateur sert notamment à former des conducteurs et à étudier les aspects humains (human-in-the-loop) dans le fonctionnement du système. Le simulateur permet de faire circuler simultanément 11 trains sur des trajets prédéfinis ou configurés à souhait, dont l'un peut être un train piloté manuellement alors que les dix autres le sont automatiquement par le scénario simulé.

### 1.3.2 Le sous-système télécommunication de l'ERTMS

Avant d'aller plus loin dans la description des propositions issues de nos travaux sur la conception et l'évaluation des systèmes de communication pour le ferroviaire, il convient

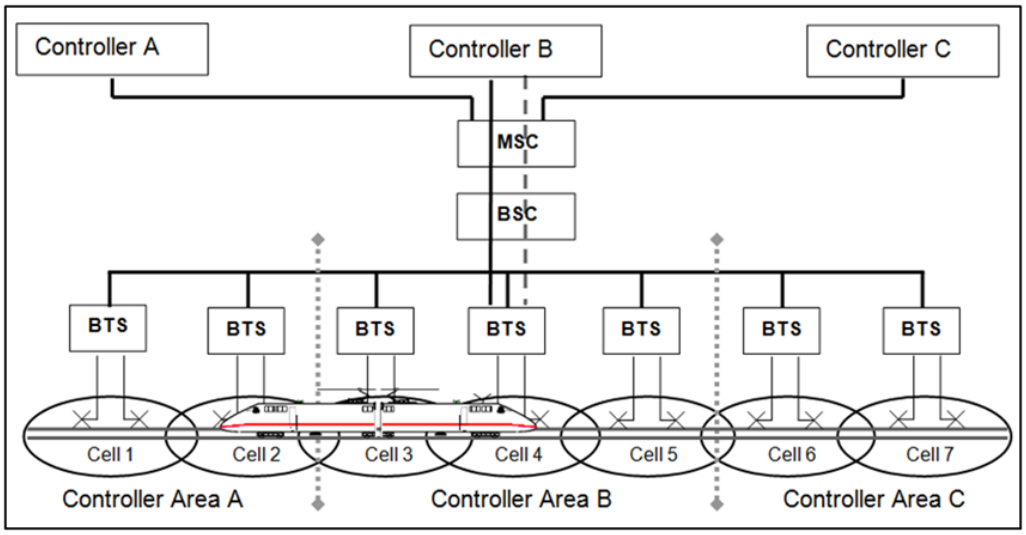



FIGURE 1.2 – Infrastructure GSM-R avec des stations de base redondants - crédit image à Siemens

de décrire le fonctionnement du sous-système de télécommunication actuel, le GSM-R, ainsi que les travaux menés sur le sujet.

Comme illustré sur la figure 1.2, une infrastructure GSM-R est une infrastructure GSM typique avec quelques aménagements spécifiques pour le besoin du ferroviaire. Le premier aménagement permet d'isoler les installations GSM-R des installations opérées pour le grand public en utilisant des bandes de fréquences dédiées réservées pour l'ERTMS. En France, la bande de fréquences de 876 MHz à 880 MHz est utilisée pour le lien montant (Train – MS – vers Station de base – BTS) et celle de 921 MHz à 925 MHz pour le lien descendant (BTS to MS), ce qui permet une vingtaine de canaux environ de 200 KHz uplink et le même nombre en downlink à affecter aux différentes BTS. Dans un déploiement typique, les BTS sont placées tous les 3 à 7 km (4 km en moyenne) le long des lignes ERTMS niveau 2 où ils permettent de prendre en charge les communications entre le centre de contrôle et les trains se déplaçant jusqu'à 500 km/h en théorie, environ 350 km en pratique. Un ensemble de BTS sont gérées par un RBC (Radio Bloc Center) correspondant aux Controller sur la figure 1.2.

Sur le plan de la conception, le choix du GSM dans la norme EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network) comme technologie de communications mobiles pour servir de sous-système de télécommunication de l'ERTMS s'est imposé pour plusieurs raisons, notamment :

- le coût accessible à la fois des équipements et de leur maintenance du fait du déploiement massif du GSM en Europe par rapport aux autres technologies de communications mobiles ;
- l'utilisation possible du GSM à la fois comme technologie pour la signalisation ETCS et comme support pour les communications mobiles professionnelles d'opérateurs férroviaires européens, ainsi que pour l'interconnexion entre l'infrastructure ERTMS et les réseaux de communcation mobiles des opérateurs de différents pays.
- la capacité du GSM-R à supporter les différents types de service nécessaires dans le contexte ferroviaire, à savoir :
  - les communications de type voix : l'appel point-à-point (PtP Call), l'appel de groupe (Voice Group Call Service - VGCS), l'appel général (Voice Broadcast Service - VBS) et l'appel d'urgence Train (Railway Emergency Call - REC) ;

- les services de prioritisation et de pré-emption multiniveaux (Multi-Level Precedence and Pre-emption Service - eMLPP) ;
- les fonctionnalités de la norme EIRENE.

Sur le plan de l'évaluation, les campagnes de tests et de mesures menées avant la mise en service du GSM-R visaient essentiellement à s'assurer que ce dernier satisferait bien les exigences de qualité de service imposées par les spécifications de l'ERTMS. Il est possible d'observer (voir fig. 1.3) par exemple que les pertes de connexion sont tolérées à raison d'1% sur une fenêtre temporelle glissante d'une heure. Si je m'aventurais à faire de l'esprit, je poserais la question de savoir si le GSM a été choisi parce qu'il respectait le mieux (face à quelles technologies concurrentes ?) ces exigences ou si ces exigences ont été synthétisées en fonction des performances connues du GSM ? Evidemment, répondre à cette question ne fait pas partie de mes objectifs de recheche. Néanmoins, l'existence de ces exigences de qualité de service établit de fait un cahier de charges pour l'évaluation de toute autre technologie de télécommunication candidate au remplacement du GSM-R.

Il s'avère que le développement de systèmes de transports intelligents (ITS - Intelligent Transportation Systems) a fait émerger de nouvelles applications basées sur la collecte et la transmission en temps réel de données de capteurs et de données sur le trafic, via une infrastructure de communication, pour la sûreté et la surveillance (au sens monitoring) des systèmes de transports, d'une part. Et que, d'autre part, des technologies de communications mobiles à haut débit plus récentes que le GSM ont permis l'émergence de nouveaux services d'information, de confort ou simplement utilitaires pour les usagers. Ces derniers aspirent donc légitimement à retrouver certaines de ces applications lorsqu'ils sont dans les transports. Cet état de fait constitue à la fois un argument de vente pour l'opérateur de transport, mais aussi un marché où ce dernier se retrouve en concurrence avec les opérateurs de télécommunication grand public. Une fois de plus, je m'éloigne un peu de l'objet de mon étude, mais c'est pour souligner que cela pose inévitablement à la collectivité des questions qui conduisent toutes à une reconsidération du GSM-R en tant que technologie pour les futurs déploiements à grande échelle d'une technologie de communication pour le système de transport ferroviaire. La question fondamentale est celle de savoir si une technologie plus récente que le GSM-R permettant d'offrir ces nouveaux services est en même temps capable de supporter tous les services initialement assurés par le GSM-R et de satisfaire les exigences de qualité de service imposées par l'ERTMS à son interface.

| QoS Parameter | Value |
|---|---|
| Connection establishment delay of mobile originated calls | < 8.5s (95%), ≤10s (100%) |
| Connection establishment error ratio | $<10^{-2}$ |
| Maximum end-to-end transfer delay (of 30 byte data block) | ≤ 0.5s (99%) |
| Connection loss rate | ≤ $10^{-2}$ /h |
| Transmission interference period | < 0.8s (95%), <1s (99%) |
| Error-free period | >20s (95%), >7s(99%) |
| Network registration delay | ≤30s (95%), ≤35s (99%), ≤40s (100%) |

FIGURE 1.3 – Exigences de qualité de service sur les interfaces GSM-R

Aujourd'hui, la conception des technologies de communication vise une portée beaucoup plus générale, à l'envergure des villes intelligentes (smart cities), plutôt qu'un seul domaine d'application. La majorité des travaux spécifiques à un secteur, en l'occurence les

systèmes de transport, s'intéressent surtout à l'adaptation et à l'évaluation de technologies, existentes ou en cours de développement, prises sur étagère pour un besoin spécifique. Ainsi, plusieurs travaux se sont intéressés successivement à l'utilisation d'autres technologies à place du GSM-R, notamment le GPRS (General Packet Radio Service) [14], le WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [15, 16], le LTE (Long Term Evolution) [17] et plus récemment la 5G [18].

Une première idée sur les performances de ces technologies peut être obtenue à travers les nombreuses évaluations analytiques, par simulation et sur banc d'essais disponibles dans la littérature scientifique et technique. Dans les travaux susmentionnés [14][16][17], les auteurs ont eu recours au simulateur OPNET Modeler, désormais propriété de Riverbed, un des simulateurs les plus complets pour la modélisation et l'évaluation des technologies de réseaux et de télécommunication. Les évaluations proposées sont menées sur des scenarios inspirés de l'environnement ferroviaire (trajectoires et vitesses de trains, déploiement de l'infrastructure de télécommunication le long des voies, trafic applicatif, etc). Dans [16], un effort important est fourni pour reproduire les applications ETCS effectuant des échanges périodiques entre le train et le centre de contrôle, notamment ceux impliqués dans la localisation du train. un déploiement WIMAX est proposé à la place du GSM-R sur les voies empruntées par le train suivant un itinéraire type défini dans le scénario. D'autres trafics applicatifs sont introduits pour illustrer les applications additionnelles de confort que le WIMAX permettrait d'offrir, en plus de ce que le GSM-R propose actuellement. Les travaux sur le LTE [17] vont plus loin dans la modélisation du déploiement et du mouvement des trains en proposant une architecture LTE en substitution du GSM-R sur un itinéraire couvrant une partie des voies danoises actuellement équipées ERTMS niveau 2. Les stations de base LTE (eNodeB, en sigle eNB) sont placées approximativement aux positions des stations de base GSM-R. Néanmoins, le trafic applicatif reste sensiblement proche de celui proposé par [16], le but étant toujours principalement de montrer les possibilités additionnelles offertes par le LTE par rapport au GSM-R. Malgré les efforts réalisés dans la modélisation dans ces différents travaux pour se rapprocher le plus possible de la réalité lors des simulations, quelques améliorations peuvent être envisagées. Elles soulignent les limites de ces évaluations et la portée des conclusions qui peuvent en découler. Elles seront détaillées dans la section suivante.

### 1.3.3 Discussions sur les évaluations des sous-systèmes de l'ERTMS

#### 1.3.3.1 Discussion sur les objectifs des évaluations

La première discussion porte sur l'objectif des évaluations. Cet objectif est très clair concernant le sous-système fonctionnel (ETCS). En effet, il s'agit essentiellement de vérifier que le comportement du système en simulation est conforme aux spécifications. Ainsi, comme indiqué en section 1.3.1, le subset 026 [13] précise toutes les fonctionnalités que doit implémenter tout outil dédié à l'évaluation du sous-système fonctionnel de l'ERTMS. En revanche, concernant le sous-système de télécommunication, plusieurs objectifs d'évaluation peuvent émerger. La tendance dominante dans les travaux précités renvoie à l'objectif de montrer qu'une technologie de communication donnée offre de meilleures performances que le GSM-R sur les fonctionnalités déjà assurées par ce dernier et qu'elle permettrait en plus de supporter de nouveaux services. Une autre tendance, celle dans laquelle nous nous inscrivons, consiste à intégrer la technologie de communication dans l'évaluation globale de l'ERTMS, conjointement avec les autres composants. Ainsi la technologie de communication serait évaluée en même temps que les autres composants suivant l'objectif d'évaluation

défini par le scénario ERTMS simulé, et non plus de manière isolée en comparaison avec le GSM-R.

#### 1.3.3.2 Discussions sur les modalités des évalutions

Les différentes tendances dans les objectifs impliquent une discussion sur les modalités des évaluations. Les simulateurs ERTMS présentés en section 1.3.1 modélisent bien la partie fonctionnelle, mais ils n'intègrent qu'une modélisation très simple du sous-système de télécommunication. En effet, même si jusqu'à deux RBC physiques peuvent être connectés au simulateur pour assurer la transmission des messages entre le modèle du centre de contrôle et les modèles des trains, la liaison sans-fil y est substituée par une liaison filaire avec une borne maximale sur le délai. Dans le contexte actuel, où la technologie de communication est clairement identifiée, le GSM-R, avec des performances connues théoriquement et affinées par de nombreuses campagnes de mesures, il est raisonnable d'admettre qu'une telle approximation soit correcte dans une simulation où l'objectif premier est surtout d'évaluer les aspects fonctionnels. Mais dès lors qu'on s'intéresse à l'impact des dysfonctionnements du sous-système de télécommunication, voire à l'usage d'autres technologies de communication en lieu et place du GSM-R, une modélisation plus avancée de tous les mécanismes impliqués dans les opérations de communication et qui pourraient avoir un impact est nécessaire. J'ai proposé dès 2012 un état de l'art détaillé et un argumentaire motivant les recherches entreprises dans ce sens dans [19], à peu près à la même période que d'autres auteurs [20]. Toutes les évaluations de l'ERTMS réalisées avec ces outils en l'état ne sont donc valides que sous l'hypothèse d'un strict respect par la technologie de communication des exigences de QoS évoquées précédemment (Fig.1.3). Ce constat explique la démarche suivie par la plupart de travaux qui se sont penchés sur l'évaluation des technologies de communication pour l'ERTMS. En effet, il suffit donc d'établir, par quelque moyen, qu'une technologie de communication satisfait les exigences de QoS imposées au GSM-R dans les scénarios ferroviaires envisagés pour établir que cette technologie pourrait être adaptée à l'ERTMS. La démarche suivie consiste donc à privilégier l'utilisation d'un simulateur de réseaux de communication, en l'occurence OPNET. Ainsi, les mécanismes de simulation et les modèles de réseaux de communications étant fournis par le simulateur, il n'y a plus qu'à y implémenter les éléments du scénario ERTMS qui sont concernés par la communication sans-fil.

La proposition [14] part des modèles de base dans OPNET pour proposer la modélisation d'une infrastructure de communication GPRS pour le ferroviaire. Les trains modélisés par des noeuds mobiles communiquent via des stations de base avec le coeur du réseau, notamment les BSC (Base Station Controler) qui jouent le rôle de RBC. Les éléments du scénario ERTMS en lien avec les communications sans-fil retenus sont les positions des BTS, la trajectoire et la vitesse des trains ainsi que le trafic échangé entre le train et le centre de contrôle via les communications sans-fil. Dans ces premiers travaux, le déploiement de l'infrastructure, les trajectoires et les vitesses sont paramétrés à partir de valeurs types, sans relation directe avec de voies ERTMS existantes. Le trafic échangé entre les trains et le centre de contrôle se limite à la signalisation GPRS et à un message périodique ETCS envoyé par le train au centre de contrôle.

Le travail proposé par [16] sur le WIMAX progresse dans cette approche en améliorant la modélisation du trafic ETCS. De plus, il introduit du trafic additionnel pouvant représenter de nouveaux services non proposées avec le GSM-R initialement.

Enfin, la modélisation du déploiement de l'infrastructure, des trajectoires et vitesses

des trains, est davantage améliorée par [17]. Dans leur proposition d'utiliser le LTE dans l'ERTMS, les positions des eNB sont fixées aux positions initiales des BTS GSM-R le long de voies ERTMS 2 au Danemark. La modélisation des trajectoires ainsi que le paramétrage des vitesses sont également basés sur les données des mêmes lignes ERTMS 2. Cela permet de rattacher l'évaluation du sous-système de télécommunication ainsi modélisé dans OPNET avec une évaluation de la partie fonctionnelle, dans les mêmes conditions, sur un même scénario ERTMS. Comme dans les travaux précédemment cités, il n'y a pas de modélisation du GSM-R dans OPNET pour pouvoir comparer directement les technologies. Néanmoins, dans le cadre de ces derniers travaux [17], il est possible de comparer les résultats de la simulation du LTE via OPNET avec les données réelles disponibles sur les communications entre les trains et le centre de contrôle via le GSM-R sur les mêmes voies ERTMS dans le cadre d'un scénario existant. En revanche, il n'est toujours pas possible d'obtenir une telle évaluation comparative pour des scénarios imaginés en laboratoire dans une étude proactive.

#### 1.3.3.3 Synthèse des discussions

L'évolution des travaux suivant cette approche, où l'évaluation du sous-système de télécommunication est déconnectée de l'évaluation de la partie fonctionnelle, met en exergue quelques constats.

D'une part, afin d'obtenir des évaluations plus pertinentes, il s'avère de plus en plus nécessaire de reproduire dans le simulateur de réseaux, en l'occurence OPNET, des éléments du scénario ferroviaire en s'appuyant sur des données réalitstes : déploiement de l'infrastructure de réseau de communication, trajectoires de trains, profils de voies et de vitesses, trafic échangé entre le train et le centre de contrôle via le lien sans-fil, etc. Or, toutes ces données, à l'exception des positions fines des stations de base, sont déjà disponibles et modélisés dans les simulateurs ERTMS utilisés pour l'évaluation de la partie fonctionnelle. L'argument de ne pas développer le modèle du sous-système de télécommunication dans un simulateur ERTMS et de recourir à un simulateur de réseau pour réduire les délais et les coûts en développements informatiques est ainsi contré par cet état de fait. De plus, le passage au niveau 3 de l'ETCS va nécessiter la modélisation du système de géolocalisation. Certaines des fonctionnalités associées nécessiteront des développements supplémentaires, il faudra donc les réaliser dans le simulateur dédié à l'évaluation de chaque sous-système de l'ERTMS, soit le double du travail nécessaire.

D'autre part, il faut se rappeler que les exigences de QoS précédemment évoquées ont été fixées en fonction à la fois des fonctionnalités ETCS et de la capacité des technologies de communication de l'époque. Ces exigences peuvent fortement évoluer en fonction des performances que pourront offrir les technologies de communication actuelles et futures. Le processus d'évaluation des sous-systèmes de l'ERTMS passerait donc du modèle atuel où les exigences du sous-système fontionnel fournissent le référentiel pour l'évaluation du sous-système de télécommunication à un modèle interactif où parfois une évaluation de ce dernier pourrait fournir de nouveaux seuils en termes de qualité de service garantie au premier.

Enfin, les nombreuses et longues campagnes de mesures qui ont conduit à l'adoption du GSM-R ne sont plus envisageables de nos jours. Le recours à des moyens informatiques, sous forme de laboratoire virtuel, constitue une opportunité pour valider en phase de pré-certification tout un ensemble de caractéristiques de toute technologie candidate à une intégration dans l'ERTMS. En revanche, si le cadre normatif fourni à travers le

subset 026 pourrait permettre aux simulateurs ERTMS qui s'y conforment d'intégrer un tel processus de pré-certification, il n'existe rien d'équivalent concernant des simulateurs de réseaux de communication. La pré-certification des technologies de communication nécessite donc encore un outil adapté. C'est une opportunité de recherche, mais également un enjeu industriel. En effet, jusqu'à la fin du projet VEGAS, la France n'hébergeait pas de centre de certification de référence ERTMS. Le LEF (Laboratoire ERTMS France) n'a été mis en place que deux années plus tard en octobre 2018. Nous pensions à l'époque que développer un laboratoire tel que celui envisagé dans VEGAS aurait permis à la France de se positionner en centre de pré-certification virtuelle. Certes, aujourd'hui le LEF permet à la France de réaliser des certifications virtuelles, mais uniquement pour valider les aspects fonctionnels. Une extension à la certification du sous-système de télécommunication reste un besoin, notamment dans le but de réduire les coûts des tests sur site. La section suivante présentera notre contribution dans ce contexte.

## 1.4 Laboratoire virtuel basé sur la cosimulation pour l'ERTMS

### 1.4.1 L'approche cosimulation

La synthèse proposée en section 1.3.3.3 nous a permis de concevoir et de proposer une nouvelle approche pour l'évaluation de l'ERTMS. Nous proposons dès 2012 [19] la piste d'un laboratoire virtuel qui interconnecte deux simulateurs : un simulateur ERTMS pour évaluer la partie fonctionnelle et un simulateur de réseau de communication pour évaluer le sous-système de télécommunication. Les principaux arguments en faveur de cette approche sont notamment :

- la conservation dans le laboratoire virtuel d'un simulateur ERTMS conforme aux exigences fonctionnelles et dont les évaluations pourraient donc plus facilement être prises en compte dans une démarche de pré-certification. Le simulateur ERTMS choisi est celui édité par ERSA France, aujourd'hui filiale d'un des leaders de l'édition logicielle pour le ferroviaire, à savoir Clearsy.
- l'utilisation d'un simulateur de réseau pour modéliser finement le sous-système de télécommunication et pouvoir modifier la technologie de communication utilisée de manière simple et rapide en s'appuyant sur les modèles fournis par le simulateur de réseau dont c'est la spécialité.
- l'interconnexion des deux simulateurs permet un échange d'informations qui réduit fortement la quantité des développements à réaliser dans le simulateur de réseau pour modéliser l'environnement ferroviaire. En effet, les informations sur la dynamique des trains et les messages échangés peuvent être transmises par le simulateur ERTMS au simulateur de réseau. De plus, cette interconnection permet de mettre en oeuvre le modèle d'évaluation interactif évoqué en section 1.3.3.3. En effet, toute nouvelle évolution des données fonctionnelles ou des exigences de QoS peut être transmise au simulateur de réseau. De même, toute nouvelle technologie de communication évaluée avec le simulateur de réseau en perspective d'une utilisation dans l'ERTMS peut fournir ses seuils de qualité de services observés durant les évaluations aux procédures fonctionnelles en vue de leur adaptation éventuelle.

Nous avons considéré principalement deux problèmes à résoudre afin de réaliser ce laboratoire virtuel basé sur l'interconnexion de deux simulateurs :

- la formalisation de la notion de scénario afin de garantir que la représentation d'une de ses instances, respectivement dans chacun des deux simulateurs, renvoie bien au

même objet. Ainsi, il sera possible d'établir un cadre méthodologique pour déterminer que l'évaluation menée conjointement sur les deux simulateurs porte bien sur le même scénario et établir les conditions de sa validité.

– bien que davantage de nature technique, la synchronisation des deux simulateurs doit être clairement définie et analysée du fait de son incidence sur la validité de la cosimulation.

### 1.4.2 Le scénario : concept et implémentation

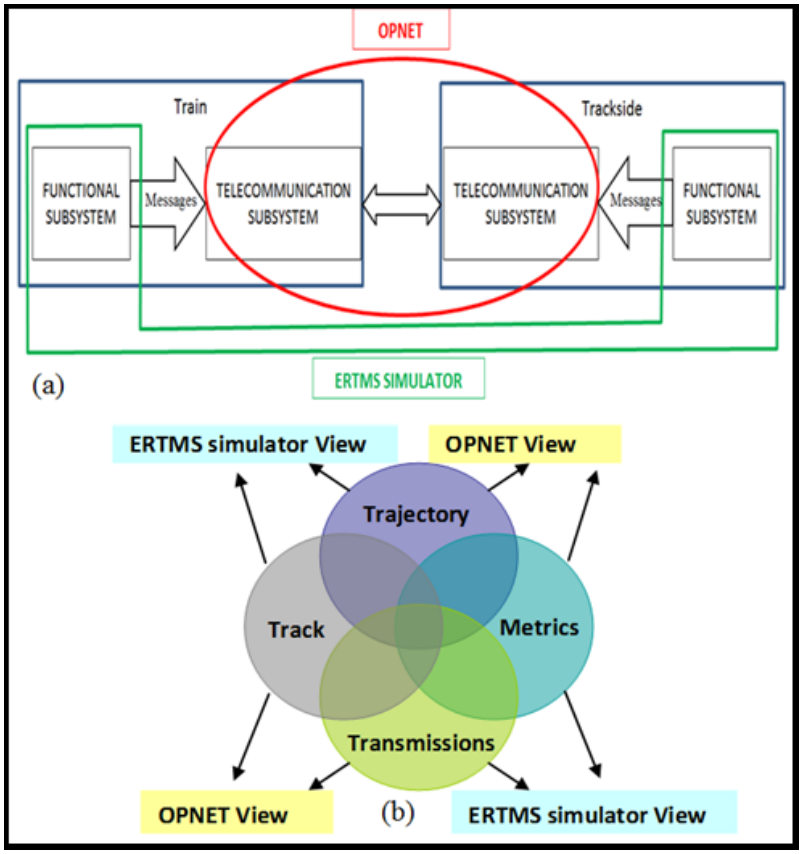



FIGURE 1.4 – Concept de scénario et ses vues en cosimulation

Le scénario de cosimulation est introduit comme un concept regroupant l'ensemble des éléments qui nécessitent une représentation dans chacun des simulateurs. Comme défini de manière plus détaillée dans [19], le scénario $S$ est un quadruplet $S(Tk, Tj, Tx, M)$. Sans perte de généralité, ni révendication d'exhaustivité, nous proposons que tout élément relatif à un scénario de cosimulation puisse être rattaché à l'une de ses composantes décrites ci-après :

– **Track (Tk)** : regroupe les éléments physiques d'un scénario qui matérialise la ligne ferroviaire simulée, à savoir les voies impliquées, les éléments de localisation et de signalisation (balises, feux, etc), l'infrastructure de réseau de communication, initialement le GSM-R (BTS, RBC, etc).

– **Trajectory (Tj)** : associe les éléments de **Track** avec les positions successives de chaque train et les dates correspondantes. Peuvent y être ajoutées toutes les informations liées à la cinématique du train (vitesse, accélération, etc).

– **Transmissions (Tx)** : regroupe tous les messages envoyés entre chaque train et le centre de contrôle, ainsi que tout élément pouvant être assimilé à une transmission

de message entre entités évoluant dans le scénario (par exemple entre un client à bord d'un train avec un serveur d'application sur Internet, du moment que la communication passe par l'infrastructure réseau évaluée). Un élément de **Transmissions** associe le message à un élément de **Trajectory**, à une date ainsi qu'à d'autres informations qui permettent de s'assurer de l'ordre de traitement des messages.

– **Metrics (M)** : comprend tous les indicateurs permettant d'évaluer un scénario. Il peut s'agir de paramètres fonctionnels observables, des exigences de qualité de service, des métriques de performance des réseaux de communication (délai, taux de perte paquets, etc).

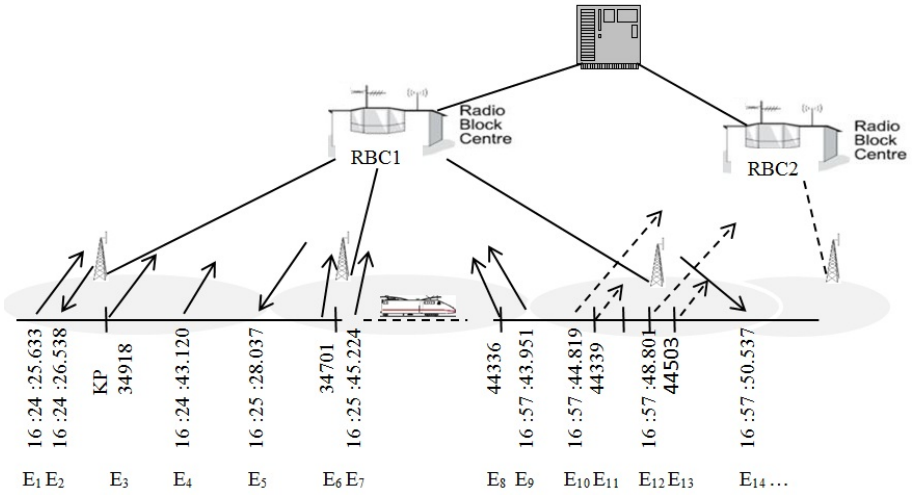



FIGURE 1.5 – Scénario élaboré à partir de traces réelles

Pour chaque scénario $S$, on peut générer une vue adaptée à chacun des deux simulateurs lors de la cosimulation (Fig. 1.4(b)). Ainsi, la même composante peut avoir une composition très détaillée dans sa vue pour un simulateur et, au contraire, très sommaire dans sa vue pour l'autre simulateur, en fonction des informations réellement utiles pour chacun d'eux. Cette figure illustre également la répartition des parties simulées par chaque simulateur côté train et côté centre de contrôle (Fig. 1.4(a)). En particulier, tout message généré dans le simulateur ERTMS est transféré dans le simulateur de réseau afin que sa transmission soit simulée.

Le scénario $S$ est construit en partie à partir de données de trafic ferroviaire disponibles dans le simulateur ERTMS. S'agissant de $Tk$, ces données peuvent aussi bien correspondre à des modélisations de voies ERTMS 2 réelles ou simplement à des voies type introduites par un modélisateur pour des besoins d'évaluation précis. Les trajectoires $Tj$ et les transmissions $Tx$ peuvent être obtenues de cette façon également pendant le déroulement d'une simulation ERTMS. Le modélisateur peut également insérer des trajectoires spécifiques à des fins de test ou ajouter des transmissions arbitraires (ce qui permettrait d'évaluer du trafic non ERTMS). Les métriques $M$ peuvent être définies par le modélisateur, mais les simulateurs de réseau en propose généralement un très grand nombre prêtes à l'usage.

J'ai montré [21] en 2013 comment un scénario pouvait être élaboré à partir de données réelles de trafic ferroviaire en combinant les données statiques des voies (pour construire $Tk$) avec les enregistrements des équipements embarqués (pour élaborer $Tj$ et $Tx$). La figure 1.5 illustre, à partir de données obtenues auprès d'un industriel (Alstom), comment les transmissions envoyées ou reçues par le train peuvent être modélisées comme des événéments successifs $(E_1, E_1, ..., E_n)$ associés à la fois à un point sur la voie et à une date.

On retrouve ainsi le lien entre $Tk$, $Tj$ et $Tx$.

Le grand avantage de recourir à des traces réelles réside dans le fait qu'il est ensuite possible de comparer les résultats des évaluations par simulation, notamment sur les métriques ($M$) des réseaux de communication, avec les données réelles enregistrées par les équipements embarqués afin de vérifier et valider la qualité des modèles et de l'évaluation. La principale difficulté était l'accès à ces données, généralement très protégées par les opérateurs, les industriels et l'administration du ferroviaire. Un fait très encourageant pour poursuivre dans cette direction a été la publication quelques mois après d'un communiqué de Réseau Ferré de France (RFF) annonçant l'ouverture de ses données sur l'infrastructure ferroviaire à des fins de recherche.

### 1.4.3 Le laboratoire virtuel

Afin de faire la preuve de concept de l'approche d'évaluation par cosimulation proposée, nous avons mis en oeuvre un prototype de laboratoire virtuel. Développé dans le cadre du projet ANR VEGAS, il interconnecte le simulateur ERTMS développé par ERSA France pour la partie fonctionnelle et le simulateur OPNET.

#### 1.4.3.1 Architecture et synchronisation

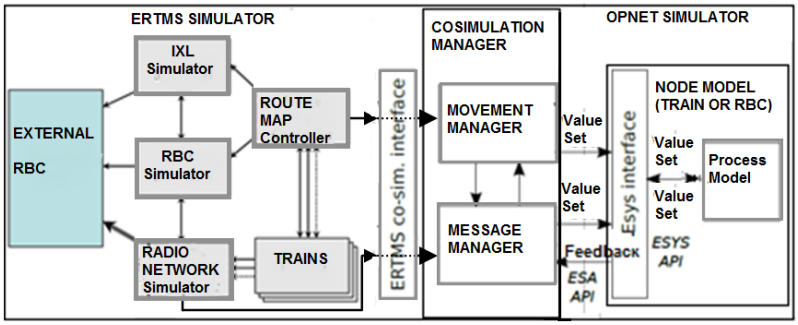



FIGURE 1.6 – Architecture du laboratoire virtuel ERTMS-OPNET

L'architecture réalisée (Fig. 1.6) repose sur un module intermédiaire, le Cosimulation Manager, que j'ai développé pour interconnecter et synchroniser les deux simulateurs. OPNET est un simulateur à événements discrets capable de supporter des mécanismes de type pause/reprise. Il fournit un module (ESYS - External SYStem) et une API (ESA - External Simulation Access) qui permettent de définir une interface d'interaction entre le simulateur et un module externe. Nous les avons utilisés pour piloter la simulation du sous-système de télécommunication à partir du Cosimulation Manager. Le simulateur ERTMS est un logiciel commercial soumis à des contraintes normatives et contractuelles. Nous avons donc dû développé avec ERSA France une interface spécifique par laquelle le simulateur ERTMS peut interagir avec un module extérieur, en l'occurence le Cosimulation Manager, sans que son propre fonctionnement interne ne soit impacté. De plus, comme c'est un simulateur continu qui ne supporte pas de mécanismes de type pause/reprise, j'ai dû introduire deux modes de synchronisation :

– un **mode online** : les données produites par le simulateur ERTMS et qui sont nécessaires pour construire la vue du scénario pour le simulateur de réseau sont transférées à l'interface du Cosimulation Manager. Celles susceptibles d'être impactées par le comportement du sous-système de télécommunication sont mises en attente et ne

seront traitées qu'après le retour du Cosimulation Manager vers l'interface du simulateur ERTMS. Une option permet au modélisateur de définir le comportement par défaut lorsque le délai fonctionnel de ce retour est dépassé. Ce mode correspond à une véritable évaluation conjointe qui permet de valider que chacun des sous-systèmes a été évalué sur le même scénario en prenant en compte l'impact du fonctionnement de l'autre sous-système.

– un **mode offline** : les données produites par le simulateur ERTMS et qui sont nécessaires pour construire la vue du scénario pour le simulateur de réseau sont transférées en même temps aux modules internes du simulateur ERTMS et à l'interface du Cosimulation Manager. En revanche, il n'y a donc aucune donnée mise en attente et les entrées du Cosimulation Manager à l'interface du simulateur ERTMS sont ignorées. Le but est de fournir au Cosimulation Manager toutes les données nécessaires afin que celui-ci poursuive la cosimulation avec OPNET, de manière décalée voire en replay. Ce mode correspond déjà à une version améliorée de l'approche suivie par les travaux antérieurs. En effet, les données de l'environnement ferroviaire, de la dynamique des trains ainsi que le trafic lié aux communications sans fil viennent bien du simulateur ERTMS. Il n'est pas nécessaire d'effectuer des développements spécifiques pour les introduire dans OPNET. En revanche, contrairement à une vraie cosimulation, ce mode permet uniquement d'analyser les performances du sous-système de télécommunication pour un scénario donné. Il ne permet pas de prendre en compte l'impact des communications sans-fil sur le déroulement du scénario d'un point de vue fonctionnel. Au maximum, il sera simplement possible de supposer que la technologie de communication peut convenir au scénario ERTMS évalué si toutes les données de la partie Métriques (M) du Scénario respectent les exigences de qualité de service.

En pratique, grâce à la formalisation du concept de scénario et au mécanisme des vues, il est possible de reprendre des traces d'exécution d'une évaluation fonctionnelle réalisée sur le simulateur ERTMS et de l'utiliser pour réaliser une simulation offline, pilotée par le Cosimulation Manager, du même scénario dans OPNET afin obtenir les performances du sous-système de télécommunication. De même, lorsque le Cosimulation Manager détecte qu'une simulation online diverge (délai de retour à l'interface ERTMS dépassé, par exemple), il peut notifier le modélisateur et basculer en mode offline. Cela permet de maîtriser l'évolution de la cosimulation et statuer sur les limites de sa validité.

#### 1.4.3.2 Description technique

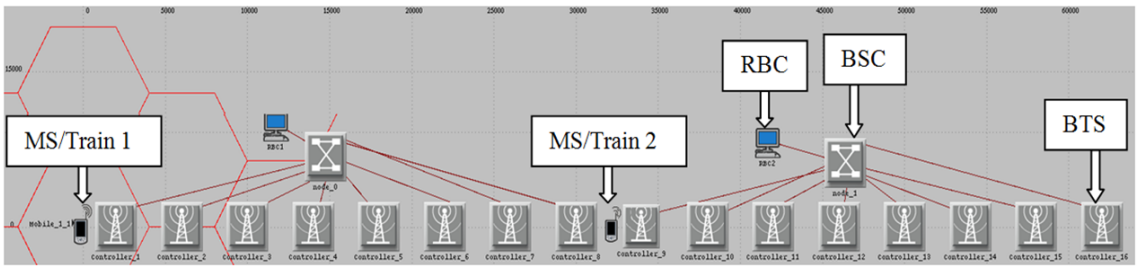



FIGURE 1.7 – Vue d'un scénario dans OPNET avec 2 trains (MS) et 2 RBC

Une description technique détaillée de l'intégralité du laboratoire virtuel ainsi que de quelques cas d'usage est disponible dans un chapitre d'ouvrage [7]. Afin d'en donner un aperçu concret, la figure 1.7 montre un déploiement GSM-R basé sur un modèle que j'ai développé à partir des modèles de noeuds TDMA d'OPNET. Les stations de base

(BTS) ainsi que les trains, représentés par les noeuds mobiles (MS - Mobile Station), sont contrôlés par le Cosimulation Manager via l'interface ESYS. Ainsi, même si les positions des BTS sont fixées par le modélisateur (les BTS n'existent pas dans la modélisation du simulateur ERTMS), les trains suivent la trajectoire que leur impose la vue du scénario via le Cosimulation Manager, à partir des données provenant de l'interface avec le simulateur ERTMS. Tous les échanges liés au déploiement et au mouvement des trains sont gérés par le Movement Manager.

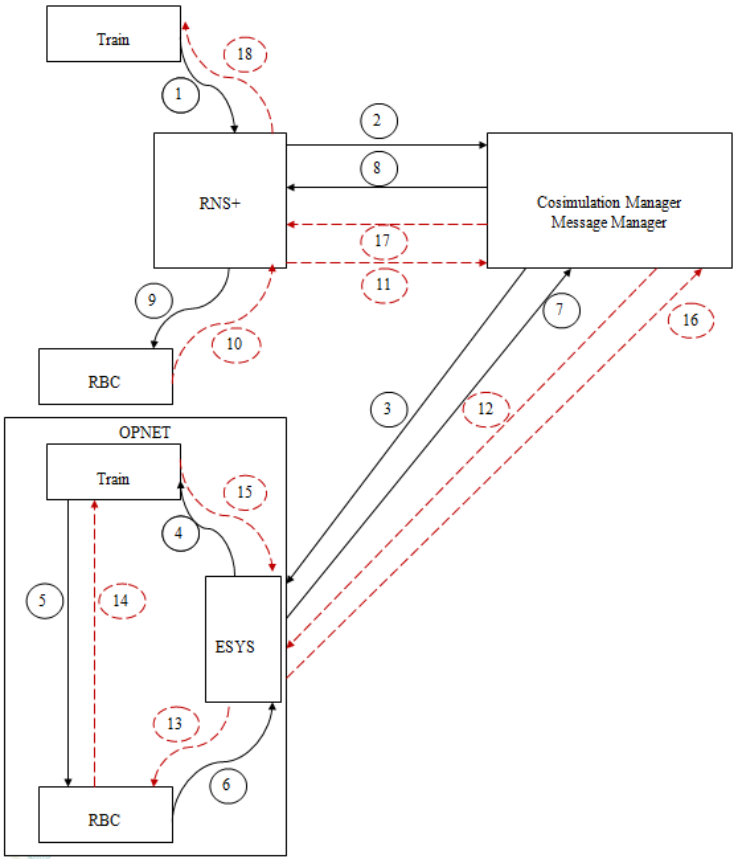



FIGURE 1.8 – Parcours d'un message émis et de la réponse associée en cosimulation

Quant aux messages, ils sont générés par le train ou le centre de contrôle dans le simulateur ERTMS, il arrivent au module RNS+ qui les transmet au Message Manager tel qu'illustré par la figure 1.8. Le message émis par le modèle du train dans le simulateur ERTMS est pris en charge par la cosimulation jusqu'à ce qu'il parvienne au modèle du train dans OPNET (flèches noires de 1 à 4). Ensuite, sa transmission via la technologie sans fil est simulée (flèche noire 5). La cosimulation prend en charge l'information sur la réception du message par le modèle du RBC dans OPNET ainsi que les métriques associées puis en notifie le modèle du RBC dans le simulateur ERTMS (flèches noires de 6 à 9). La réponse du RBC vers le train est simulé de la même manière (flèches rouges de 10 à 18).

Une interface graphique permet, à partir du Cosimulation Manager, de lancer une cosimulation et observer en temps réel l'état des simulateurs impliqués ainsi que les données échangées. Un système de logs permet de suivre en détail le déroulement de chaque moment de la simulation sur chaque simulateur. Ces détails sur les aspects purement logiciels sont en partie décrits dans la référence précitée [7].

## 1.5 Conclusion et perspectives

### 1.5.1 Discussions et conclusion

J'ai présenté dans ce chapitre ma contribution à l'évaluation des systèmes de communication dédiés aux transports terrestres, en l'occurence au ferroviaire. Cette contribution se matérialise par une approche, des concepts, des modèles ainsi que la mise en oeuvre d'une cosimulation pour réaliser l'évaluation conjointe des sous-systèmes fonctionnel et télécommunication de l'ERTMS.

La plupart de travaux menés dans ce contexte abordaient séparément l'évaluation de la partie fonctionnelle du système de celle de la partie télécommunication. La principale raison est que les outils d'évaluation pour l'ERTMS se sont focalisés sur la modélisation des aspects fonctionnels en ayant le GSM-R pour seule perspective en termes de technologie de communication. Face à la difficulté et au coût que représenterait le développement de toute la partie fonctionnelle de l'ERTMS dans un simulateur de réseau, les travaux qui se sont intéressés à l'utilisation de technologies de communication plus récentes dans le ferroviaire ont concentré leur effort à montrer, sur la seule base d'une modélisation des flux applicatifs, que ces dernières permettraient de faire mieux que le GSM-R. Je dis qu'ici se trouve le premier biais dans l'approche. En effet, que quelque technologie de communications mobiles plus récente que le GSM soit meilleure que le GSM-R tombe sous le sens. La véritable question que se pose le modélisateur vise à savoir tous les avantages et les inconvénients induits par une technologie plus récente dans tous les scénarios d'intérêt afin que soit déterminé le rapport bénéfices/coûts, au sens large, pour passer de l'ancienne technologie à la nouvelle. Il n'est pas possible de répondre à cette question autrement qu'en associant l'évaluation de la technologie aux scénarios d'intérêt. Je postule que c'est la raison pour laquelle les travaux antérieures ont évolué en modélisant de plus en plus les éléments de l'environnement ferroviaire dans le simulateur de réseau.

Le second biais soulevé par cette approche est que cette précision croissante est restée tributaire d'un objectif global tourné essentiellement vers l'évaluation de performances de la technologie. A ce sujet, je maintiens qu'il y a une erreur sur l'objectif. Il s'agit ici de réseaux opérés où l'ingénierie s'emploiera à déployer à chaque endroit autant d'équipements que nécessaires pour assurer les performances souhaitées. L'évaluation doit se focaliser sur une liaison singulière, mais dans tous les scénarios d'intérêt du point de vue fonctionnel. Autrement dit : "j'ai un train avec une liaison GSM-R qui passe par toutes les configurations de voies possibles, puis le même train avec une liaison LTE dans les mêmes conditions de mouvement et de communications : qu'est-ce que j'observe ?". Une fois de plus, il n'est pas possible de répondre à cette question sans connecter l'évaluation de la technologie de communication avec le sous-système fonctionnel, d'une manière ou d'une autre.

J'ai donc proposé une approche qui surmonte la difficulté liée à des développements coûteux en interconnectant deux simulateurs existants : un simulateur ERTMS pour la partie fonctionnelle et OPNET pour la partie télécommunication. La formalisation de la notion de scénario permet de définir ses vues pour chacun des simulateurs et garantir que l'évaluation réalisée dans chacun d'eux porte sur un même scénario. Les mécanismes de synchronisation proposés rendent possibles la réalisation d'une cosimulation online et la vérification en permanence de sa validité. Ils permettent également de détecter une dérive de la simulation online et de passer à une simulation offline, ce qui établit de fait la possiblité de réaliser une cosimulation en replay (offline dès le début). Le laboratoire virtuel qui résulte de ces travaux conserve tous les atouts liés au simulateur ERTMS, notamment

en matière de pré-certification de solutions pour le ferroviaire. Il offre un contexte fonctionnel complet aux évaluations menées sur le sous-système de télécommunication et il permet même de prendre en compte le comportement de ce dernier dans la simulation fonctionnelle. Il permet ainsi de réaliser une cosimulation en utilisant le GSM-R comme technologie de télécommunication ou de lui substituer n'importe quelle autre technologie en remplaçant les modèles de mobile, de station de base et de contrôleur de station de base par ceux des noeuds équivalents dans cette technologie. Le seul développement nécessaire pour ce faire consiste à ajouter le module ESYS développé pour implémenter l'interface au Cosimulation Manager dans les modèles des noeuds mobiles et des stations de base de la technologie concernée.

### 1.5.2 Perspectives

Ces travaux ont été menés entre 2011 et 2016, l'état de l'art a forcément évolué entretemps. Néanmoins, une perspective annoncée à l'époque visait une amélioration globale du laboratoire virtuel afin de supprimer tout problème de synchronisation online. Cela passait notamment par l'implémentation de mécanismes de type pause/reprise dans le simulateur ERTMS. La société ERSA France ayant été rachetée par Clearsy à l'époque de la fin du projet ANR VEGAS, nous attendons toujours que ce sujet recouvre un intérêt pour la nouvelle Entreprise. Entretemps, d'autres outils se sont développés. Par exemple, VSimRTI [22] peut véritablement servir en tant que Cosimulation Manager entre un simulateur ERTMS amélioré sur l'aspect pause/reprise et un simulateur de réseau comme OMNET++ qui y est déjà intégré. Ceci souligne une fois de plus le retard que peut prendre une initiative en recherche sur le plan industriel lorsque les entités les plus concernées par sa valorisation ne suivent pas. SNCF développement a regardé avec beaucoup d'intérêt le Cosimulation Manager, mais pour le moment un laboratoire virtuel de pré-certification pour l'ERTMS intégrant pleinement la modélisation du sous-système de télécommunication reste une belle idée dont le concept a été prouvé et prototypé ...

Une autre perpsective, plus scientifique, concerne l'amélioration du cadre formel de l'approche proposée. En effet, le concept de scénario et la cosimulation ont été formalisés davantage dans une optique opérationelle pour rendre plus pratique la réalisation du laboratoire virtuel. Néanmoins, il faut prendre en compte la forte sensibilité des travaux menés sur le sous-système fonctionnel à la modélisation formelle et à la preuve de propriétés [23]. Etendre ces méthodes à la spécification du Cosimulation Manager, voire au simulateur de réseau, permettra d'améliorer la vérification et la validation de la cosimulation, et par conséquent d'en renforcer la crédibilité dans la perspective d'un usage pour la pré-certification. Les technologies de communication sont souvent évaluées sur l'aspect performance, mais face aux enjeux de sûreté et de sécurité qu'implique leur utilisation dans les systèmes de transport, elles seront de plus en plus scrutées sur leurs propriétés intrinsèques et les garanties qu'elles peuvent offrir quant à certaines fonctionnalités. Nous avons poursuivi des travaux dans ce sens qui seront présentés au chapitre 3.

J'évoquais en introduction de ce chapitre qu'un intérêt majeur de l'ERTMS et qu'il offre un exemple de déploiement à grande échelle d'une technologie de communication pour les transports terrestres à des fins de sûreté et d'exploitation. En particulier, le niveau 3 d'ETCS qui repose sur un train géolocalisé, capable de communiquer en permanence avec le centre de contrôle via l'infrastructure et, à terme, capable de communiquer de proche en proche avec les trains qui le suivent ou le précèdent afin de conserver un rayon de sécurité autour de lui sur la voie s'apparentant à un canton mobile, correspond exactement à la situation de n'importe quel véhicule terrestre (train, tramway, voiture) évoluant sur une

voie quelconque (rail ou route). En ce sens, l'ERTMS préfigure ce que sera l'infrastructure globale de communication pour les transports terrestres étendus aux véhicules sur la route et à toute une série d'objets communicants mobiles (vélos, trotinettes, drones) ou impliqués dans la mobilité (feux de circulation, panneaux de signalisation, radars, caméras de surveillance, bornes de localisation ou de services divers, etc) dans la ville intelligente. Par conséquent, les difficultés rencontrées dans la conception et l'évaluation des systèmes de communication pour le ferroviaire se posent également pour ce système de communication global futur pour les transports terrestres. En particulier, l'expérience du GSM-R qui continue d'être déployé alors qu'obsolète montre bien que l'approche de l'infrastructure dédiée n'est pas la plus judicieuse. Il y a déjà de nombreux travaux en cours portant sur la conception, le déploiement et l'évaluation de technologies de communications reposant sur une infrastructure pour assurer les communications dans les transports. Ayant longtemps travaillé sur la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc, je me suis pour ma part particulièrement intéressé à la manière dont les zones blanches et les situations où l'infrastructure de communication est temporairement indisponible ou surchargée devraient être gérées en perspective d'un système de communication global pour les transports terrestres. Ces travaux sont présentés dans le chapitre 2.

# 2

# Modèle d'auto-organisation pour les communications véhicule-à-véhicule

## Sommaire


**2.1 Conception d'une infrastructure virtuelle pour la route . . . . . 43**
2.1.1 Idée et approche . . . . . 43
2.1.2 Présentation de Chain-Branch-Leaf . . . . . 46
2.1.3 Modélisation de *Chain Branch Leaf* (CBL) dans OLSR : CBL-OLSR . . . . . 53
2.1.4 Synthèse sur l'infrastructure virtuelle réalisée par CBL . . . . . 56
**2.2 Modèles et simulation pour l'évaluation des communications . . . . . 57**
2.2.1 Approches d'évaluation . . . . . 58
2.2.2 Outils de simulation . . . . . 58
2.2.3 Modélisation de la mobilité, des transmissions et des applications 60
**2.3 Evaluation de CBL-OLSR et principaux résultats . . . . . 73**
2.3.1 Evaluation structurelle comparative de CBL-OLSR et MPR-OLSR 73
2.3.2 Evaluation système de CBL-OLSR . . . . . 77
2.3.3 Performance de CBL pour quelques applications coopératives . . 80
**2.4 Conclusions et perspectives . . . . . 83**
2.4.1 Conclusions . . . . . 83
2.4.2 Perspectives . . . . . 84


Historiquement, il y avait les transports guidés (train, métro, tramway) qui évoluent sur des segments de voies presque exclusivement équipés et réservés à leur usage d'une part, et la voiture dont le pilotage reposait essentiellement sur les facultés de son conducteur, d'autre part. L'accessibilité croissante aux systèmes de perception/détection, de localisation et de communications sur les routes ont permis le développement de systèmes d'aide à la conduite (ADAS - Advanced Driver-Assistance Systems). Ces systèmes et applications embarqués permettent de répondre aux problèmes de sécurité routière (avec la réduction des risques), de mobilité (optimisation du trafic et minimisation des congestions) et d'environnement (optimisation de la consommation et minimisation de la pollution).

De manière générale, tous ces systèmes créent une dépendance des conducteurs qui, à terme, auront des difficultés à évoluer dans le trafic routier sans assistance. Toute personne ayant appris la conduite sur une voiture récente aurait beaucoup de mal à se rendre à 200 km de chez elle dans une voiture ancienne sans système ABS, sans direction assistée et dépourvue de GPS. Le développement de nouveaux ADAS qui dépendent de l'accès à un réseau de communication (prise de contrôle du véhicule à distance, pilotage autonome centralisé, etc) implique donc forcément que sur les routes situées dans des zones non

couvertes par une infrastructure de communications, les conducteurs se retrouveront dans l'embarras. De plus, avec le véhicule connecté, se développent des applications dites coopératives. Par exemple, dans la localisation coopérative ou ego-localisation, chaque véhicule hôte communicant exploite les informations reçues des véhicules voisins afin d'affiner et d'améliorer sa propre localisation. La perception élargie coopérative fonctionne sur le même principe en ce qui concerne le partage de cartographies électroniques de l'environnement (LDM - Local Dynamic Map).

Qu'ils équipent des véhicules pilotés ou autonomes, tous ces systèmes multi-capteurs, comme les ADAS susmentionnés, ne sauraient reposer que sur des communications passant uniquement par une infrastructure (V2I - Véhicule-à-Infrastructure). En effet, outre le fait qu'il existe des endroits où l'infrastructure est inexistante ou en panne, cette dernière pourrait être inefficace en présence de conditions dégradées ponctuelles. Si une approche centralisée a pour avantages la précision et la capacité, elle nécessite de disposer d'une infrastructure équipée de points d'accès radio à intervalles réguliers. Or, comme mentionné au chapitre 1, contrairement au ferroviaire, cela ne pourrait être garanti pour un réseau routier beaucoup plus étendu, ne serait-ce que pour des raisons de retour sur investissement, notamment dans les sections de routes peu fréquentées en général. De plus, l'information transitant par l'infrastructure peut présenter un risque d'obsolescence accrue comparativement à une communication directe véhicule-à-véhicule (V2V) lorsque les véhicules impliqués sont proches. Enfin, la mise en œuvre de certaines fonctions applicatives coopératives via des communications V2V contribuerait à la diminution globale de la charge sur l'infrastructure (temps de calcul, bande passante, etc.), ce qui permettrait de prendre en charge davantage de trafic et d'apporter aux applications une plus grande modularité et davantage de flexibilité.

Cependant, les algorithmes distribués d'accès au médium et de routage dans les réseaux ad hoc sont plus complexes et leur charge s'ajoute à celle des applications supportées par le réseau. Il est donc nécessaire de développer des protocoles de routage capables de s'adapter à ce contexte très spécifique, mais qui soient suffisamment sobres pour épargner une plus grande proportion des ressources au routage des trafics applicatifs.

Ce chapitre présente, sous l'angle de modélisation et de la simulation, les travaux de la thèse de Lucas Rivoirard (2015-2018) [1] que j'ai co-encadré avec Martine Wahl dans le cadre d'une collaboration scientifique avec l'Université Gustave Eiffel (ex-IFSTTAR). Les travaux réalisés dans cette thèse sur un algorithme de clustering, distribué et coopératif, appelé Chain-Branch-Leaf (CBL)[24], constituent une nouvelle proposition pour l'organisation du routage dans les réseaux ad hoc véhiculaires (VANET) en s'appuyant uniquement sur des communications ad hoc (V2V). Les perspectives ouvertes par cette thèse continuent à faire l'objet de nos recherches, notamment dans le cadre d'une nouvelle thèse, et d'une valorisation en cours avec la SATT Nord. Les aspects autres que scientifiques de cette collaboration seront abordés en seconde partie de ce manuscrit. Ce chapitre se focalise sur l'aspect scientifique des travaux, considérés sous l'angle de la modélisation et de la simulation.

Ainsi, ce chapitre est structuré comme suit. En s'appuyant sur un aperçu succinct de la littérature sur les grandes tendances en matière de routage dans les réseaux ad hoc, j'exprime les objectifs et les motivations qui ont conduit à la proposition portée par cette thèse. Ensuite, je montre comment la modélisation et la simulation nous ont permis progressivement d'améliorer les évaluations et de cerner à la fois l'intérêt et les limites de cette proposition. Enfin, je propose une discussion sur les perspectives de recherche ouvertes par ces travaux en vue d'une infrastructure globale de communication pour les transports terrestres.

## 2.1 Conception d'une infrastructure virtuelle pour la route

### 2.1.1 Idée et approche

Dans le développement d'un système de communications basé sur une infrastructure pour les transports terrestres, lorsque cela se fait sur la base de technologies existantes prises sur étagère comme pour l'ERTMS, la phase de conception offre assez peu de places au type de recherches que je mène. Il est davantage question d'opérer un déploiement adéquat en fonction des caractéristiques de la technologie et des besoins aux points d'intérêt sur les voies. En revanche, comme nous l'avons montré au chapitre précédent, la phase associée à l'évaluation offre encore des perspectives intéressantes.

A contrario, le développement d'un système de communication basé uniquement sur des communications véhicule-à-véhicule offre quant à lui encore de nombreux challenges en conception malgré la prolifération de propositions dans la littérature. En plus de la thèse de Lucas Rivoirard [1] dont l'état de l'art assez complet est encore d'actualité, je recommande la référence [25] pour un aperçu sur les travaux en cours. Mon objectif n'est pas de revenir sur tout cet état de l'art, mais surtout de faire ressortir les grandes tendances dans les approches afin de positionner et justifier la proposition qui a été portée par nos travaux dans le cadre de cette thèse.

#### 2.1.1.1 Aux origines : les réseaux mobiles ad hoc

Historiquement, les modèles d'organisation proposés dans les protocoles de routage pour les réseaux mobiles ad hoc (MANET) ont été explorés pour les réseaux ad hoc de véhicules. Je ne reviendrai pas sur l'inondation classique (blindflooding) dont la très grande majorité des travaux établissent l'inefficacité à bien des égards. Nous avons distingué grossièrement les modèles d'organisation qui ne maintiennent pas la topologie et opèrent généralement à la demande, d'une part, et ceux qui structurent le réseau et ont ainsi une capacité à opérer proactivement d'autre part.

Dans le premier groupe, se trouvent des protocoles réactifs tels que *Dynamic Source Routing* (DSR) [26] et *Ad-hoc On Demand Distance Vector Protocol* (AODV) [27], ainsi que tous les protocoles qui en ont été dérivés pour une application dans les VANET. Nous n'avons pas retenu cette approche, et plus généralement les modèles d'organisation qui en découlent, parce que leur mode de fonctionnement repose justement sur l'idée qu'il ne faut pas structurer le réseau. Certes, chaque noeud du réseau participe circonstanciellement à la retransmission des messages permettant aux autres noeuds de trouver des routes vers les destinations visées, ainsi qu'au routage du trafic vers ces dernières. Néanmoins, le fait que les noeuds ne maintiennent pas de topologie et qu'il ne soit pas possible de contrôler la périodicité des transmissions des messages rend difficile la mise en place et le maintien d'une infrastructure virtuelle à partir de cette approche.

Le second groupe renvoie aux protocoles proactifs tels que *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing* (DSDV) [28] et *Optimized Link State Routing protocol* (OLSR) [29] et hybrides, ainsi que toutes les variantes qui s'en sont inspirés, notamment pour les VANET. Dans une approche proactive, chaque nœud maintient une table de routage, en plus de sa table de voisins à un saut. Chacun diffuse périodiquement des paquets de routage dans le réseau, indépendamment de toute demande de transmission de paquets. Ces paquets de routage contiennent la liste des routes connues par le nœud. Ces échanges de paquets permettent la gestion des tables de routage. Une table de routage contient a minima l'adresse d'un nœud potentiellement destinataire et l'adresse du premier relais (à un saut). Les approches hybrides combinent l'approche proactive pour le voisinage proche

jusqu'à un certain nombre de sauts dans la topologie, et une approche réactive pour les destinations en dehors de cette zone. Les modèles d'organisation qui découlent de ces approches permettent la construction d'une infrastructure virtuelle. On y retrouve notamment les modèles conduisant à la formation d'une structure en arbre, les méthodes de clustering conduisant à la formation d'un groupe (cluster) de noeuds représentés par un ou plusieurs noeuds particuliers (cluster-head) et des méthodes conduisant à un maillage où chaque noeud sélectionne un ensemble de noeuds (les multipoints relais) lui permettant d'atteindre ses voisins au-délà d'un saut. Elles seront considérées par la suite.

#### 2.1.1.2 Les approches récentes post-VANET

Deux nouvelles approches se sont développées alors que les recherches sur les réseaux ad hoc de véhicules avaient déjà cours. Dans la première approche, dite opportuniste [30] et dont est issue notamment la proposition [31] pour les VANET, les noeuds du réseau prennent la décision de routage selon l'état du réseau et sur la base de caractéristiques prédéfinies. Même si elle n'intègre pas d'objectif de construction d'une structure, elle permet néanmoins d'aboutir à un certain taux de connectivité sur chaque segment de route. Néanmoins, afin de prendre en charge des applications coopératives telle que l'égo-localisation qui nécessite la formation de groupes disjoints de véhicules, il faudrait ajouter des stratégies de formation de groupe à l'approche opportuniste. Cette approche peut donc avoir un intérêt dans notre objectif d'aboutir à une infrastructure virtuelle.

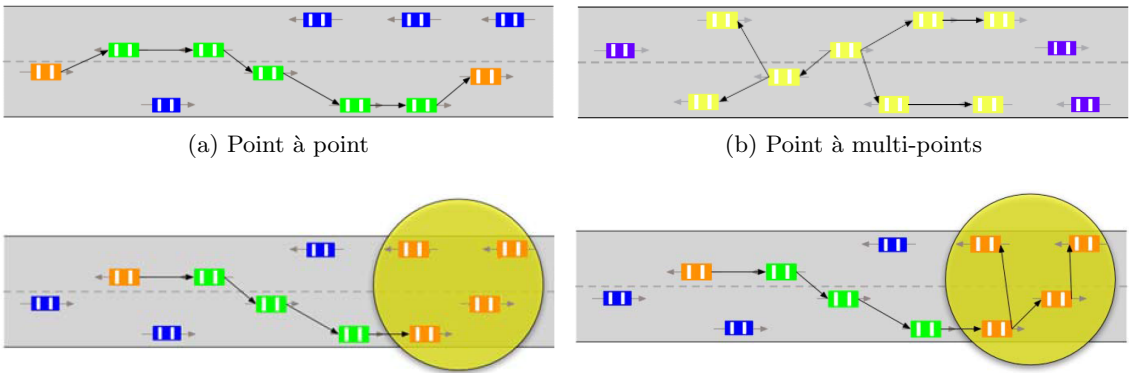
La seconde approche regroupe tous les protocoles dits géographiques [32], dont notamment *Geographic Routing Protocol* (GRP) [33]. Ce dernier utilise une méthode de routage gloutonne qui élit localement, saut après saut, chaque nœud relais suivant en minimisant la distance séparant le nœud relais du nœud destinataire, mais en association avec une division hiérarchique du réseau en zones, sous-zones, sous-sous-zones... rectangulaires. La première division du réseau correspondant au niveau hiérarchique 1. Chaque zone résultante est alors découpée en quatre sous-zones de niveau hiérarchique 2, et ainsi de suite. Afin de pouvoir s'appuyer sur la structure des zones, chaque noeud doit pouvoir connaitre sa position et s'appuyer sur un service global de localisation qui lui fournit la position de tous les destinataires potentiels. La mise en oeuvre de ce service de localisation n'est pas clarifiée dans la spécification de GRP. Notre idée d'infrastructure virtuelle ayant été conçue avec l'objectif de fonctionner en l'absence de toute infrastructure terrestre, nous retiendrons uniquement la possibilité que chaque noeud connaisse sa propre position à partir d'un système de localisation géostationnaire. En effet, la notion de zone blanche est anecdotique vis-à-vis de ce type de système et son fonctionnement n'est quasiment jamais perturbé par l'activité humaine. Il ne fait donc pas partie des infrastructures que nous excluons de notre approche.

#### 2.1.1.3 Les contraintes spatiales, fonctionnelles et applicatives

Contrairement aux modèles d'organisation proposés pour les MANET en général qui supposent une mobilité libre dans un espace ouvert, les VANET sont spatialement limités par la configuration des voies de circulation. Ainsi, si la base de l'étude est ramenée à tout segment entre deux intersections, le VANET évolue dans un espace longitudinal comportant une à plusieurs voies et un à deux sens de circulation. Si une infrastructure de communication avait été déployée pour couvrir cet espace, un point d'accès (RSU - Road Side Unit) aurait été déployé sur chaque portion du segment correspondant à peu près à une portée. Dans le cadre d'une infrastructure virtuelle, vu que le point d'accès est également un véhicule, il suffit donc qu'au moins un des véhicules encore présents sur le

segment joue le rôle de point d'accès sur une distance équivalant à une portée de communication. Intuitivement, supposons que le même groupe de véhicules traverse deux segments successifs $S_1$ et $S_2$. Lorsqu'il s'agit d'une infrastructure physique, les segments et leurs éléments d'infrastructure sont fixes. Ce sont les véhicules qui s'attachent successivement aux différents points d'accès de $S_1$ jusqu'à ce qu'ils sortent du segment, puis font la même chose sur $S_2$. Pour les véhicules circulant dans le sens opposé, c'est exactement la même chose, sauf qu'ils passent de $S_2$ à $S_1$. Dans le cadre d'une infrastructure virtuelle, les points d'accès sont des véhicules distancés les uns des autres d'une longueur proche de la portée. L'image adéquate consiste à considérer que le groupe de véhicules, restreint à ceux qui jouent le rôle de point d'accès (donc l'infrastructure virtuelle), est immobile et que c'est le segments $S_1$ qui glisse sous le groupe de véhicules avant de céder sa place à $S_2$. Cette illusion ne fonctionne pas s'il y a un second sens de circulation, car on ne peut pas faire glisser l'espace en même temps dans deux directions opposées. Par conséquent, dans le cas d'une infrastructure virtuelle, il faut un groupe de véhicules points d'accès pour chaque sens de circulation sur le segment considéré.

Afin que l'infrastructure virtuelle proposée soit en conformité avec le standard européen pour les communications véhiculaires [34], elle doit permettre de réaliser les quatre scénarios de communications spécifiés (Fig. 2.1), à savoir : point-à-point, point-à-multipoint, *GeoAnyCast* et *GeoBroadcast*.



(a) Point à point (b) Point à multi-points

(c) GeoAnycast (d) GeoBroadcast

FIGURE 2.1 – Modes de communication supportés par le protocole GeoNetworking - source [34]

En termes de contraintes applicatives, pour pouvoir naviguer au sein d'un flux d'automobiles en environnement autoroutier ou départemental, chaque véhicule pourra partager périodiquement des informations locales avec son voisinage proche (*Cooperative Awareness Message* (CAM) [35]) de sorte à synchroniser ses déplacements conformément à ceux de ses voisins. Il devra, d'autre part, être informé au plus tôt de tout changement dans l'évolution du flux de véhicules (arrêt, ralentissement, accélération de trafic, évitement d'obstacles) de façon à modifier par anticipation sa trajectoire en collaboration avec celles des véhicules de son voisinage. Cette seconde contrainte nécessite la possibilité de transfert de messages apériodiques (*Decentralized Environmental Notification Message* (DEMN) [36]) sur des distances supérieures au voisinage à un saut, entre un nœud du réseau et un ou plusieurs nœuds destinataires. De plus comme évoqué en section 2.1.1.2, afin de permettre un fonctionnement optimal des applications coopératives telles que l'égo-localisation et la percpetion élargie, les noeuds du réseau doivent former des groupes disjoints. Cette par-

tition peut être réalisée en contraignant chaque noeud du réseau à s'associer à un unique noeud point d'accès de l'infrastructure virtuelle.

### 2.1.2 Présentation de Chain-Branch-Leaf

A partir des considérations évoquées ci-avant, nous avons synthétisé une proposition qui peut s'inscrire dans les méthodes de clustering à un saut avec backbone, mais qui a l'originalité de répondre de manière explicite à tous les besoins fonctionnels évoqués. Le contenu de cette section et toutes ses sous-sections, textes et images, est directement tiré de la thèse de Lucas Rivoirard [1], notamment parce qu'à ce niveau de détail technique, il n'est pas possible d'exprimer aussi clairement les choses différemment.

Notre proposition, nommée *Chain Branch Leaf* (CBL), s'intéresse à la création de groupes de nœuds communicants à un saut avec un seul niveau de hiérarchie, formant ainsi une topologie hiérarchique. Les membres d'un groupe sont à portée directe de communication avec un responsable du groupe élu, le *cluster-head*. Ainsi, la taille des groupes est de fait limitée à deux fois la portée de transmission radio (P) (voir figure 2.2). Les responsables de groupes forment un groupe dominant connecté dans le réseau, en l'occurence l'infrastructure virtuelle dans le sens de circulation considéré (section 2.1.1.2). D'autre part, les groupes formés sont disjoints (section 2.1.1.3).

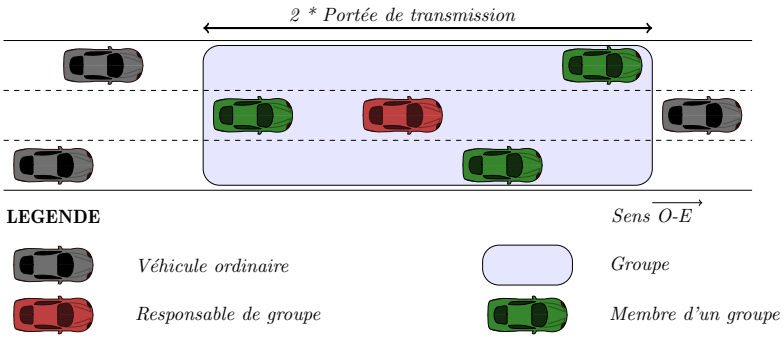



FIGURE 2.2 – Illustration, sur une autoroute à trois voies, d'un groupe (*cluster*) de véhicules créé autour d'un responsable de groupe. La taille du groupe est limitée au voisinage à un saut du responsable, soit à deux fois la portée de transmission de la technologie radio embarquée [1]

#### 2.1.2.1 Notion de nœuds branche et feuille

L'algorithme proactif CBL repose sur la spécification de deux types de nœuds : les nœuds branche et les nœuds feuille. À un instant donné, n'importe quel nœud du réseau est soit un nœud branche, soit un nœud feuille.

**Un nœud branche** est un nœud responsable d'un groupe (*cluster*) de nœuds feuille. Chaque nœud branche a un rôle de *cluster-head*. Il est élu par d'autres nœuds (branche ou feuille). Il sert de relais pour les nœuds branche et feuille l'ayant élu. Comme pour les protocoles proactifs dont nous nous sommes inspirés dans notre proposition CBL, un nœud branche réalise la découverte de son voisinage au moyen de messages périodiques HELLO. Il dispose du droit de relayer les tables de routage au sein du réseau au moyen de messages de contrôle de topologie *Topology Control* (TC). Il participe à la construction d'une chaîne de véhicules relais qui circulent dans une même direction sur la voie routière. Ainsi, acteur de la constitution de la chaîne dont il fait partie, il veille à maintenir une liaison valide avec un nœud branche en amont et un en aval de son sens de circulation et

à élire un nœud branche en amont. Le choix de ses nœuds branche, amont et aval, utilise une métrique de temps de chaîne (*ChainTime* - section 2.1.2.4). Vis-à-vis des messages applicatifs, il est un relais pour la retransmission de messages entre deux nœuds du réseau éloignés de plus d'un saut. Il peut être l'initiateur d'un message applicatif.

**Un nœud feuille** est un nœud ordinaire. Dans le schéma d'organisation du réseau CBL, chaque nœud feuille réalise la découverte de son voisinage au moyen de messages périodiques HELLO. Il établit un lien avec un nœud branche. S'il ne détecte pas de nœud branche dans son voisinage à un saut, il choisit comme nœud branche un des nœuds feuille voisins selon le procédé suivant : 1. C'est un voisin qui circule dans la même direction ; 2. En cas de concurrence, ce voisin est celui ayant la vitesse la plus faible. Tout comme un nœud branche, il peut être l'initiateur d'un message applicatif.

Remarquons que la spécification de nœuds branche et feuille crée des groupes disjoints (section 2.1.1.3) et des liaisons de natures différentes. Chaque nœud étant membre d'un unique groupe identifié par le responsable de groupe (nœud branche), les ensembles de nœuds feuille de deux groupes adjacents d'une même chaîne forment des *clusters* disjoints. Les notions de nœuds branche et feuille nous conduisent à distinguer deux types de liaisons : celles entre les nœuds feuille d'un groupe et le responsable branche du groupe, ainsi que les liaisons deux à deux entre nœuds branche qui définissent un lien entre maillons de chaîne.

#### 2.1.2.2 Notion de chaîne

Les nœuds branche sont à l'origine de la construction des chaînes. Une chaîne est un réseau fédérateur (*backbone*) virtuel composé d'une séquence ordonnée de nœuds branche qui circulent dans une même direction. Ainsi, une chaîne est créée par sens de circulation dont chaque nœud branche constitue l'un des maillons. Vis-à-vis du routage, les chaînes supportent le trafic des messages de topologie *Topology Control* (TC) transmis par relayage de nœuds branche en nœuds branche. Vis-à-vis des messages applicatifs, les chaînes offrent un service de transfert de messages d'un nœud source à un ou plusieurs nœuds destinataire éloignés de plus d'un saut. La figure 2.3 illustre une formation de chaîne sur une autoroute à trois voies. Remarquons que l'ensemble des nœuds branche forme un groupe dominant connecté car tout nœud du réseau est soit un nœud branche, soit un nœud feuille rattaché directement à un nœud branche et que tout nœud branche peut atteindre n'importe quel nœud par une route dont les nœuds intermédiaires sont des nœuds branche.

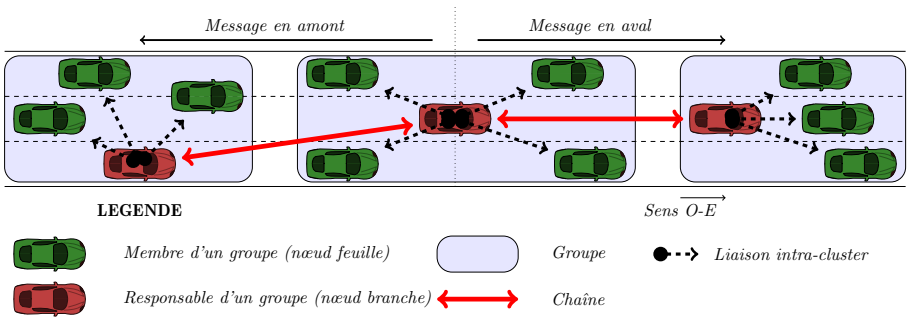



FIGURE 2.3 – Illustration de la création d'une chaîne dans un cas autoroutier avec le concept d'envoi des messages en fonction du sens de circulation, en aval ou en amont du trafic [1]

#### 2.1.2.3 Spécification du sens de propagation d'un message applicatif

Pour que les messages applicatifs puissent être transférés en amont ou en aval d'une chaîne, ou encore diffusés à tous les nœuds au voisinage d'une chaîne, un champ contenant une information de direction est ajouté à l'entête des paquets des messages applicatifs. Soit "Dir" le nom de ce champ d'en-tête. "Dir" code les consignes suivantes de façon à permettre pour un paquet donné l'exécution d'une de ces consignes ou d'un ensemble de ces consignes : transmettre en aval du trafic, transmettre en amont du trafic, transmettre au voisinage proche et transmettre à tous les nœuds du réseau.

Avec ce champ, l'algorithme contrôle la propagation d'un message applicatif, limitant les risques d'inondation du VANET (*broadcast strom*). Par exemple, selon le codage de "Dir" dans l'en-tête du message applicatif, il sera possible d'émettre un message d'alerte de risque d'embouteillage (message *Decentralized Environmental Notification Message* (DENM)) en aval du trafic ; ou un message d'alerte de la présence d'un véhicule prioritaire (police, pompier...) en amont ; ou encore un message périodique pour signaler sa présence aux véhicules voisins (message CAM).

#### 2.1.2.4 Définition des métriques utilisées

La création de la chaîne CBL nécessite l'usage des quatre métriques de décisions suivantes : la position des nœuds, la vitesse des nœuds, la direction des nœuds et le degré d'un nœud.

Nous travaillons sur un espace à deux dimensions au même titre que la plupart des protocoles de la littérature et contrairement aux travaux de [37] sur le protocole *Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks* (GPSR) qui comparent les résultats obtenus à deux et trois dimensions.

**La position** $[X_i, Y_i]$ d'un nœud mobile $N_i$ est utilisée par CBL pour calculer la distance séparant deux nœuds. Elle intervient également dans le calcul de la métrique du temps de connexion et du temps de chaîne ($ChainTime$). Nous posons l'hypothèse que chaque position $[X_i, Y_i]$ d'un nœud mobile $N_i$ est donnée par un système de positionnement satellitaire équipant le véhicule du nœud.

**La vitesse des nœuds comprend la vitesse absolue $V_i$ et la valeur de l'angle de braquage** $\sigma_i$ moyennée sur une seconde. CBL utilise la vitesse absolue pour ordonnancer les véhicules. L'angle de braquage permet de les classifier en fonction de leur sens de circulation. La vitesse est d'autre part nécessaire au calcul de la métrique du temps de connexion ($CT$) et du temps de chaîne ($ChainTime$). Les valeurs $(V_i, \sigma_i)$ peuvent être obtenues au moyen d'un système inertiel et d'un capteur d'angle ou encore être déduites par le suivi des positions successives des nœuds.

**Le degré (*Degree*) d'un nœud voisin $N_j$ à un saut de** $N_i$ est le nombre de voisins symétriques de ce nœud $N_j$ après exclusion du nœud $N_i$ et des nœuds du voisinage à un saut de $N_i$. Cette métrique est utilisée afin d'identifier les nœuds voisins à un saut qui apportent la connaissance de nouveaux nœuds voisins.

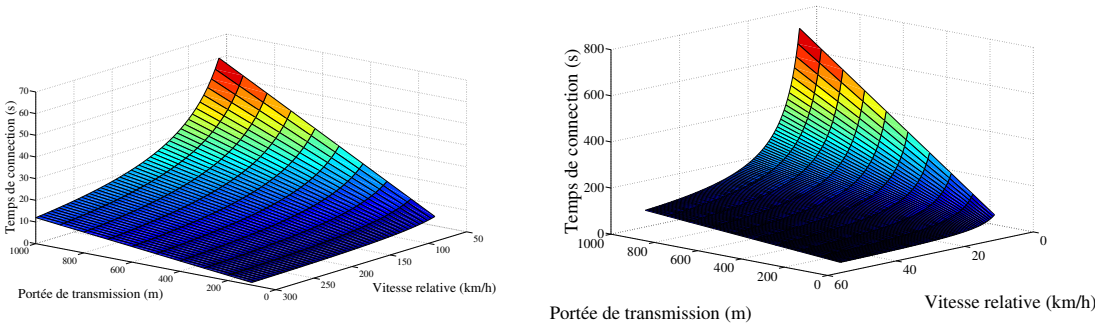
**Le temps de connexion *Connection Time* (CT)** est calculé à partir de la position, la vitesse et la direction des nœuds. Il est utilisé par un nœud feuille pour choisir son nœud branche relais. Il est défini comme le temps durant lequel les nœuds pourraient communiquer s'ils gardaient une vitesse constante. Nous avons pris pour temps de connexion la métrique définie dans [38] et [39], conforme à l'équation 2.1.

$$CT(N_i, N_j) = \frac{-(ab+cd) + \sqrt{(a^2+c^2) * P^2 - (ab-bc)^2}}{a^2+c^2} \tag{2.1}$$

$$\left\{ \begin{array}{rcl|rcl} a & = & V_i cos(\sigma_i) - V_j cos(\sigma_j) & b & = & X_i - X_j \\ c & = & V_i sin(\sigma_i) - V_j sin(\sigma_j) & d & = & Y_i - Y_j \end{array} \right.$$

avec $P$ la portée radio maximale de la technologie réseau utilisée.

La figure 2.4 illustre le temps de connexion entre deux véhicules en fonction de leur interdistance et de leur vitesse relative lorsque la technologie de réseau utilisée est le *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11p. La figure 2.4b montre les résultats obtenus pour deux véhicules circulant dans la même direction, et la figure 2.4a le cas pour deux véhicules évoluant dans des directions opposées. Dans cet exemple, nous observons que les valeurs maximales prises par le $CT$ dans le cas de deux véhicules en sens opposés sont comprises entre 5 et 20 secondes. Pour deux véhicules allant dans le même sens de circulation avec une vitesse relative faible (inférieure à 10 km/h), le temps de connexion peut dépasser 100 secondes.




(a) Cas de deux véhicules en sens opposé de circulation (b) Cas de deux véhicules dans le même sens de circulation

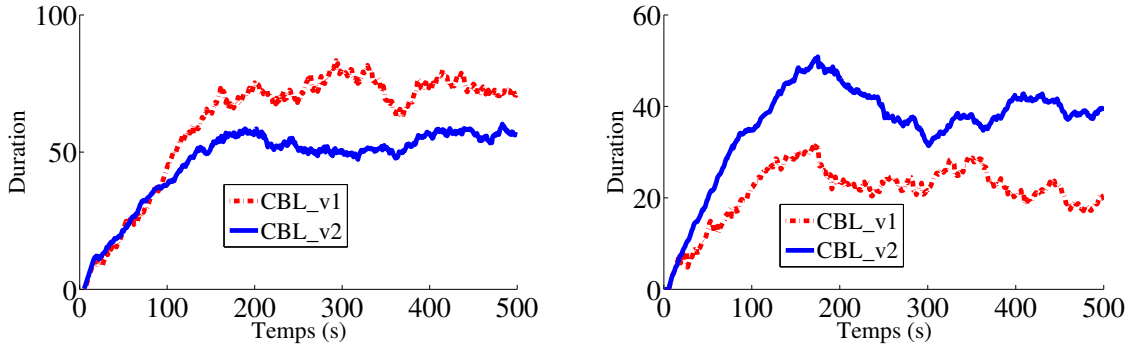
FIGURE 2.4 – Temps de connexion $CT$ en fonction de la vitesse relative et de la portée de transmission [1]

**Le temps de chaîne (*ChainTime*)** est une nouvelle métrique que nous avons définie pour le choix de l'élection des nœuds branche amont et aval d'un nœud branche. Son calcul repose sur celui du temps de connexion *Connection Time* (CT). Il est défini, pour deux nœuds branche d'une chaîne, comme le temps minimum entre leur CT et la durée écoulée avant qu'un des deux nœuds ne dépasse l'autre. *ChainTime* est donné par l'équation 2.2

$$ChainTime(N_i, N_j) = \left\{ \begin{array}{ll} CT(N_i, N_j) & si\ N_i\ en\ aval\ de\ N_j\ et\ V_j < V_i \\ CT(N_i, N_j) & si\ N_i\ en\ amont\ de\ N_j\ et\ V_j > V_i \\ min\left[CT(N_i, N_j), \frac{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{|V_i - V_j|}\right] & sinon \end{array} \right. \tag{2.2}$$

Un effet immédiat du paramètre *ChainTime* est illustré sur la figure 2.5. La durée moyenne de rattachement de noeuds feuilles au même noeud branche augmente (Fig. 2.5b), presque du simple (CBL_v1) au double (CBL_v2), même si cette adaptation fait baisser globalement la durée pendant laquelle un noeud conserve le statut de noeud branche (Fig. 2.5a). L'interprétation est que le trafic généré par un noeud donné passera encore plus longuement par l'intermédiaire du même noeud relais, ce qui est souvent le cas en

présence d'une infrastructure fixe. Une présentation détaillée de l'implémentation de CBL incluant les formats des messages, l'encodage des variables et leur utilisation dans la gestion de l'infrastructure virtuelle, ainsi que la définition et le calibrage des seuils temporels est proposée dans [40].




(a) Durée moyenne d'un noeud dans le statut de noeud branche

(b) Durée moyenne de rattachement d'un noeud feuille au même noeud branche

FIGURE 2.5 – Illustration de la stabilité accrue de CBL grâce au paramètre *ChainTime*

#### 2.1.2.5 Algorithmes de construction de la structure CBL

Une présentation détaillée des algorithmes qui interviennent dans la mise en oeuvre et la maintenance de l'infrastructure virtuelle grâce à CBL est proposée dans [24]. Des améliorations permettant notamment d'allonger la durée de rattachement des noeuds feuilles à leur branche, renforçant ainsi la stabilité globale de l'infrastructure virtuelle, sont quant à elles présentées dans [41]. Je me limiterai ici à une présentation succincte permettant de comprendre le fonctionnement global de CBL.

**Procédure d'émission d'un message HELLO**

A intervalle de durée constante *HELLO_INTERVAL* :

1. Un message HELLO est créé par un nœud $N_i$.
2. Encapsulé, il est mis dans la file d'attente pour une prochaine transmission.
3. $N_i$ mémorise la date de création du message dans sa variable locale T5.

Le message HELLO de CBL créé contient les valeurs des variables locales du nœud $N_i$ décrites dans [40]. Ces valeurs ont été régulièrement mises à jour après chacune des réceptions de messages HELLO en provenance de nœuds voisins qui sont intervenues, dans l'intervalle "*HELLO_INTERVAL*", depuis la précédente transmission de HELLO par $N_i$.

**Diagramme fonctionnel de CBL à réception d'un message HELLO** :

À l'initialisation du réseau, aucun groupe n'est formé, tous les nœuds du réseau sont des nœuds feuille. Les messages HELLO échangés par les nœuds enclenchent le mécanisme de création de la topologie hiérarchique. À réception d'un message HELLO en provenance d'un nœud voisin, $N_i$ exécute la procédure illustrée en figure 2.6.

En première tâche, l'algorithme 1 réalise la mise à jour de la table de routage contenant la liste des nœuds voisins à un saut.

Ensuite, selon le type (branche ou feuille) du nœud récepteur $N_i$, les tâches exécutées seront celles de l'algorithme 5 (si $N_i$ est un nœud branche) ou de l'algorithme 2 (si $N_i$ est un nœud feuille). L'algorithme 5 a pour fonction de réinitialiser le nœud branche $N_i$ en un nœud feuille. L'algorithme 2 a pour fonction de transformer le nœud feuille $N_i$ en un nœud branche si le nœud émetteur du message reçu l'a élu au titre de nœud relais.

À l'issue des algorithmes 2 ou 5, selon la nature résultante du nœud récepteur $N_i$, feuille ou branche, l'algorithme 3 (si $N_i$ est un nœud feuille) ou l'algorithme 4 (si $N_i$ est un nœud branche) est exécuté. L'algorithme 3 permet au nœud feuille $N_i$ de réaliser, vérifier ou maintenir l'élection de son nœud branche relais associé. L'algorithme 4 permet au nœud branche $N_i$ de réaliser, vérifier ou maintenir l'élection des nœuds branche de sa chaîne, en amont et en aval du sens de circulation du trafic routier.

FIGURE 2.6 – Procédure utilisée lors de la réception d'un message HELLO [1]

Ce fonctionnement simple permet à chaque noeud, entre deux émissions successives de ses messages HELLO *HELLO_INTERVAL*, de mettre à jour son statut à partir de sa connaissance sur sa situation et de celle de ses voisins obtenue à partir des messages HELLO reçus de leur part dans ce laps de temps. Ainsi, il peut décider de son status et ses éventuels choix de noeud branche (ou noeuds branche avant et arrière) et en notifier ses voisins directs à l'émission de son prochain message HELLO.

Ce mode de fonctionnement permet une maintenance des clusters et de de la dorsale sur la base d'un seul type de message et un seul paramètre temporel. En effet, il est ainsi possible de contrôler plus ou moins finement l'évolution de la structure en réglant le *HELLO_INTERVAL*. Dans le cadre de ces travaux, il a été fixé à une seconde.

**Quelques propriétés de CBL**

A défaut de pouvoir entrer dans les détails du fonctionnement de l'algorithme, quelques éléments sur son fonctionnement méritent d'être relevés :

- Dans l'organisation imposée par CBL, les nœuds branche jouent le rôle de relais lors du routage d'information entre nœuds distants de plus d'un saut. Chacun est le *cluster-head* d'un ensemble vide ou constitué du ou des nœuds feuille qui l'ont élu. Les groupes définis selon le schéma CBL possèdent donc la propriété suivante qui pourra être utilisée au profit de la mise en œuvre des applications coopératives : sachant qu'un nœud feuille ne sélectionne qu'un nœud branche et qu'un nœud branche ne se rattache au plus qu'à deux nœuds branche d'une même chaîne (l'un en amont de sa position et l'autre en aval), **chaque groupe de nœuds feuille agrégés autour d'un nœud branche définit un ensemble disjoint de ceux constitués autour des nœuds branche voisins. Cette propriété de CBL sera fondamentale dans la prise en charge des applications coopératives**.
- CBL fait appel à sept coefficients pondérateurs (L1, L2, L3, C1, C2, C3 et $\alpha$) dont les quatre premiers, les seuils C1, C2, C3 et L3 ont été fixés de sorte à améliorer la réactivité de l'algorithme. La valeur des autres seuils (L1=0,5, L2=5 et $\alpha$=0,5) a été choisie de manière arbitraire. Une analyse de la sensibilité de l'algorithme à une variation de ces valeurs fixées arbitrairement, observée sur le nombre total de noeuds feuille (Ms1), montre qu'elle n'est que très faiblement impactée 2.7.

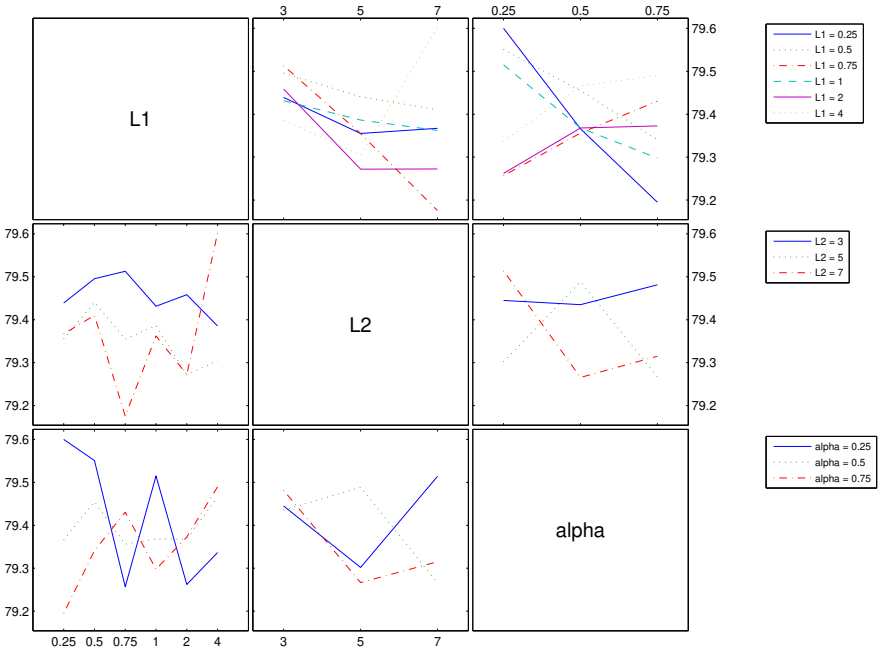
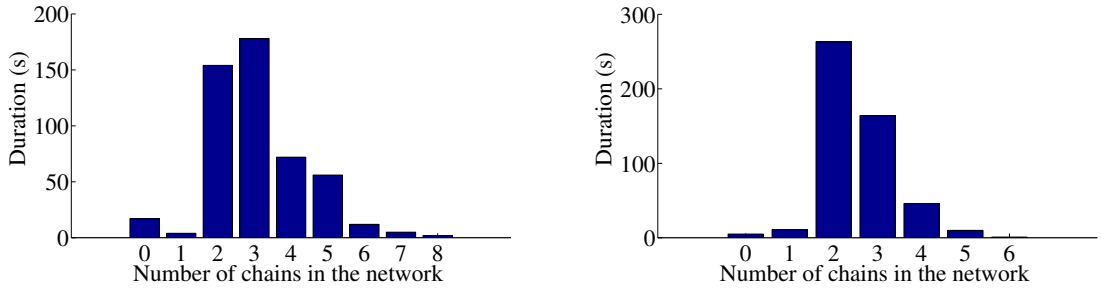



FIGURE 2.7 – Impact observé via Ms1 entre t=150-300 s des coefficients pondérateurs L1, L2 et alpha sur la structure CBL – Scénario S5 cas A (axe des ordonnées en %)

- L'analyse a montré que plusieurs situations pouvaient conduire à l'apparition de chaînes parallèles dans un même sens de circulation. Le problème a pu être résolu par divers mécanismes détaillés dans [1], notamment en restreignant l'autorisation d'extension de la chaîne qu'en amont dans un sens de circulation. En ne permettant

plus l'extension de la chaîne concurremment en amont et en aval, une cause de choix conflictuel susceptible d'engendrer des chaînes parallèles est supprimée. L'effet de ce choix sur la stabilité des chaînes est notamment montré dans une comparaison des structures de l'infrastructure virtuelle avant et après cette mesure [41]. Sur une route à deux sens de circulation, l'organisation imposée par CBL doit aboutir à la construction de deux chaînes idéalement, une dans chaque sens de circulation. La figure 2.8 montre qu'avant l'introduction de la restriction d'extension en amont uniquement, l'apparition de chaînes parallèles et autres ruptures de chaînes pouvaient conduire jusqu'à l'observation de huit chaînes (CBL_v1). La durée correspondant à l'observation de deux chaînes était limitée au tiers (150 s) de la durée totale du scénario (500 s). Après l'application de la restriction, cette durée s'établit presque au double de la valeur initiale (CBL_v2) et les fractionnements de chaînes sont moins nombreux et moins fréquents.




(a) CBL_v1 (b) CBL_v2

FIGURE 2.8 – Durée cumulée pour chaque valeur de nombre de chaînes observée dans le VANET

### 2.1.3 Modélisation de CBL dans OLSR : CBL-OLSR

Une présentation détaillée de la mise en oeuvre de CBL dans OLSR étant disponible dans [40], je reprends dans cette section une partie de la présentation qui en a été faite dans la thèse de Lucas Rivoirard [1].

Si CBL est un modèle d'organisation opérant de manière proactive, il ne spécifie pas l'intégralité d'un protocole de routage. Par exemple, CBL ne spécifie pas les mécanismes de recherche de route. Afin d'être opérationnel, il nécessite donc d'être mis en œuvre dans un protocole de routage. Outre un système de positionnement géostationnaire qui permet à chaque noeud de connaître sa propre position, le fonctionnement de CBL repose essentiellement sur l'envoi périodique de messages. Toute mise en œuvre de CBL dans un protocole de routage existant nécessite donc, s'il n'en existe pas déjà à travers les applications déployées (des messages CAM par exemple), la définition de l'envoi périodique de messages.

Parmi les protocoles de routage connus, nous avons présenté en section 2.1.1.1 le protocole OLSR qui est particulièrement adapté aux réseaux à forte densité [42]. Une autre raison pour laquelle OLSR est un candidat intéressant pour une implémentation de CBL, provient de ses caractéristiques. OLSR est un protocole de routage ad hoc dont le fonctionnement repose d'une part sur l'émission périodique de messages HELLO également nécessaires au fonctionnement de CBL d'une part, et d'autre part sur la définition de deux types de nœuds, les nœuds *Multipoint Relay* (MPR) (nœuds relais du protocole) et des

nœuds ordinaires comme pour CBL avec les nœuds branche et les nœuds feuille. La mise en œuvre de CBL au sein du protocole OLSR donne lieu à la proposition de la variante *Chain Branch Leaf - Optimized Link State Routing protocol* (CBL-OLSR). Les informations nécessaires au fonctionnement de CBL seront ajoutées dans les messages HELLO envoyés par OLSR.

#### 2.1.3.1 Correspondance entre MPR et nœuds branche

Le protocole OLSR effectue une structuration du réseau par l'intermédiaire des nœuds MPR dans le but d'économiser les ressources radios. Le principe de sélection des nœuds MPR est le suivant : chaque nœud $N_i$ du réseau sélectionne un ensemble de voisins à un saut lui permettant de communiquer avec son voisinage à deux sauts. Les nœuds MPR sont utilisés comme relais permettant au nœud qui les a élus de communiquer avec son voisinage à deux sauts. Seuls les nœuds de cet ensemble retransmettent les messages envoyés en *broadcast* par leur électeur.

Le schéma CBL permet, comme dans le protocole OLSR, de former une hiérarchie dans le réseau grâce à la distinction de deux types de nœuds. L'implémentation de CBL au sein de OLSR s'est donc naturellement orientée vers l'utilisation des nœuds branche de CBL comme des nœuds MPR. Les nœuds branche héritent alors des mêmes fonctionnalités que celles des nœuds MPR. Ce sont des nœuds qui relaient les messages envoyés en mode *broadcast* (comme les messages TC par exemple). Il est à noter que l'implémentation de CBL au sein de OLSR impacte le choix des routes initialement conçues par CBL. En effet le protocole OLSR effectue une recherche de route par l'algorithme du plus court chemin calculé grâce au nombre de nœuds relais d'une route. Il est possible qu'une route contienne des nœuds non-MPR qui ont alors pour fonction de relayer un message envoyé en mode *unicast* utilisant cette route. Ainsi, comme l'implémentation, proposée ici de CBL au sein de OLSR, consiste à définir les nœuds branche comme les nœuds MPR et les nœuds feuille comme les nœuds non-MPR, il est possible qu'un nœud feuille ait pour fonction de relayer un message envoyé en mode *unicast*.

#### 2.1.3.2 Modification du format des paquets et services de communications de CBL-OLSR

L'implémentation de CBL au sein du protocole OLSR nécessite une modification afin d'inclure l'information de direction des messages "Dir" (section 2.1.2.3). Cette information est ajoutée dans l'en-tête des messages de OLSR au niveau du type de message qui est codé initialement sur 8 bits. Or, dans la version initiale du protocole OLSR, le type de message ne peut prendre que des valeurs entières comprises entre 1 et 4. L'implémentation proposée utilise les quatre premiers bits pour coder l'information "Dir" (voir tableau 2.1 et figure 2.9). Lorsqu'un message est reçu par un nœud branche, il est retransmis de la manière suivante :

1. Si la valeur du premier bit est à 1, le message est retransmis à tous les nœuds branche dans le voisinage à un saut (dont les nœuds branche d'un autre sens de circulation). Ce mode de retransmission correspond au mode *broadcast*.
2. Si la valeur du deuxième bit est à 1, le message est retransmis au nœud branche aval ;
3. Si la valeur du troisième bit est à 1, le message est retransmis au nœud branche amont ;
4. Si la valeur du quatrième bit est à 1, le message est retransmis aux nœuds feuille élus.

| Message type | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Transmission à tous les nœuds branche (mode *broadcast*) | 1 | - | - | - | | | | |
| Transmission à @ChainUP | - | 1 | - | - | Conforme | | | |
| Transmission à @ChainDO | - | - | 1 | - | à | | | |
| Transmission aux nœuds feuille élus | - | - | - | 1 | OLSR | | | |

TABLEAU 2.1 – Modification pour CBL du "message type" défini dans le protocole OLSR pour prendre en compte les différents cas de retransmission possible.

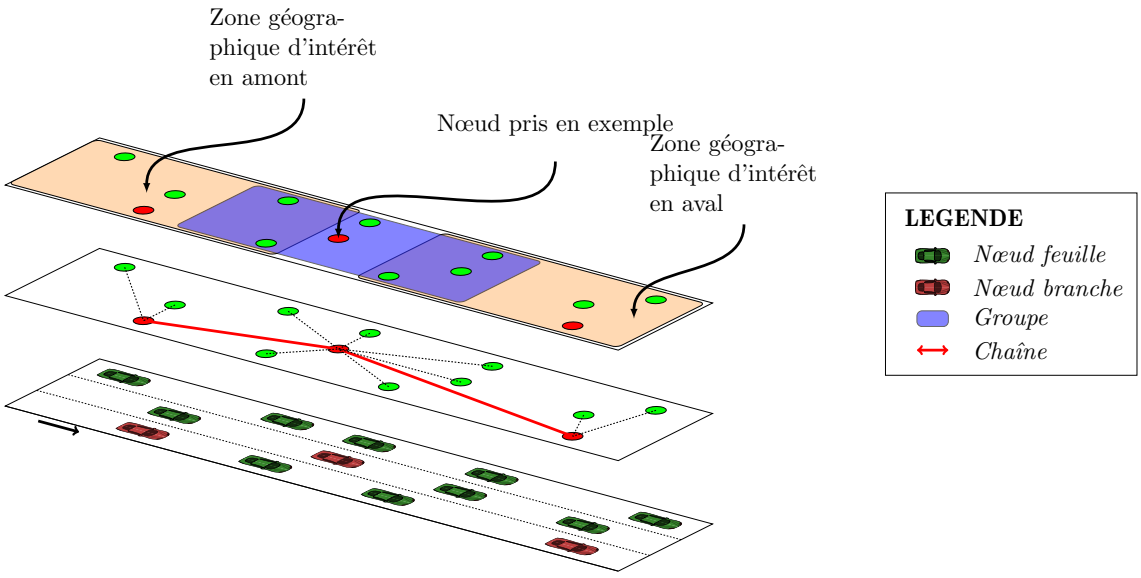



FIGURE 2.9 – Nœuds et liens fonctionnels de CBL : en bas, illustration d'un trafic routier ; au milieu, nœuds CBL correspondant aux véhicules représentés et liens entre nœuds ; en haut, mise en valeur des zones d'intérêt en amont et en aval d'un nœud branche particulier.

L'information de direction des messages "Dir" permet à la structure d'infrastructure virtuelle obtenue grâce à CBL d'apporter une solution aux quatre scénarios de communication définis dans [34] pour les applications automobiles spécifiées par l'*European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) : point-à-point, point-à-multipoint, *GeoAnyCast* et *GeoBroadcast* (section 2.1.1.3, figure 2.1). Pour une implémentation CBL-OLSR, les scénarios de communication point-à-point et point-à-multipoint sont respectivement réalisés par les mécanismes *unicast* et *multicast* du protocole OLSR. Les scénarios *GeoAnyCast* et *GeoBroadcast* pourraient être mis en œuvre conjointement avec les informations de position contenues dans la table de routage des nœuds voisins, celles de direction des messages "Dir", avec le codage d'un nouveau type de mode de communication dans le champ "Message type" à l'aide des bits libres restants d'OLSR (tableau 2.1) et en recourant à la structure CBL. Soit une zone d'intérêt géographique vers laquelle un nœud source veut envoyer un message (cercle jaune dans la figure 2.1). Le nœud source identifierait la position relative en amont ou aval de cette zone d'intérêt. Il enverrait le message applicatif (contenant un nouveau champ identifiant la position et la taille de la zone géographique) au nœud de sa chaîne avec l'information de direction "Dir" paramétrée pour que le message soit propagé dans le sens adéquat. À chaque réception du message par un nœud branche relais, lorsque le champ "Message type" indique une communication selon l'un des scénarios *GeoAnyCast* et *GeoBroadcast*, le nœud vérifierait si la position du nœud branche suivant se situe dans la zone cible. Dans le cas d'un scénario *GeoAnyCast*, lorsque cette zone est atteinte, le nœud relais écraserait le champ *Time To Live* (TTL) du message avec une valeur de 1 validant une dernière retransmission. Dans le cas d'un scénario *GeoBroadcast*,

lorsque cette zone est atteinte, le nœud relais écraserait le champ "Dir" du message avec la valeur "1001XXXX" permettant la diffusion locale à tous les nœuds branche et nœuds feuille. Chaque nœud branche recevant ce message le rediffuserait dans le cas où il est situé dans la zone cible.

L'implémentation de CBL au sein du protocole OLSR a également nécessité plusieurs modifications au niveau des messages HELLO pour ajouter les informations de position, de type de nœud (branche ou feuille) et de vitesse, d'angle de direction ainsi que du choix des nœuds concernant la structure de la chaîne (@BranchChoice, @ChainUP et @ChainDO).

#### 2.1.3.3 Méthode de recherche de route

Le principe de recherche de route du protocole OLSR n'a pas été modifié par la mise en œuvre de CBL-OLSR. Comme dans le protocole OLSR, les messages TC sont envoyés par les nœuds relais. Chaque nœud relais inscrit dans ses messages TC la liste des nœuds voisins l'ayant sélectionnés. Ainsi, les nœuds branches de CBL-OLSR génèrent les messages TC contenant la liste de leurs nœuds feuilles rattachés. Ces messages sont relayés dans tout le réseau en mode *broadcast* avec la chaîne.

#### 2.1.3.4 Modification des tables de voisins

Cette section 2.1.3.4 termine la présentation de l'algorithme avec la description des modifications qui ont été apportées à l'en-tête et au corps des messages HELLO lors de la mise en œuvre de CBL dans OLSR. Les tables de routage de chaque nœud ont été modifiées pour ajouter les informations supplémentaires concernant les nœuds voisins. Cette table contient treize champs dont le codage est présenté dans le tableau 2.2.

| Champs | 1 Adresse | 2 Lien | 3 Date 1 | 4 Date 2 | 5 Position X | 6 Position Y | 7 Vitesse | 8 Angle | 9 Type | 10 Elected | 11 N.Br.Choice | 12 N.ChainDO | 13 N.ChainUP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de bits utilisées pour le codage | 32 | 2 | 32 | 32 | 16 | 16 | 8 | 8 | 1 | 1 | 32 | 32 | 32 |

TABLEAU 2.2 – Codage de la table des voisins à un saut d'un nœud

### 2.1.4 Synthèse sur l'infrastructure virtuelle réalisée par CBL

Dans cette section, nous avons montré que la méthode de clustering CBL permet de réaliser une infrastructure virtuelle dans chaque sens de circulation. Cette infrastructure interconnecte tous les véhicules grâce à une dorsale (chaîne) formée par des noeuds élus, les branches, qui font office de points d'accès. Tous les noeuds non élus, les feuilles, lorsqu'ils évoluent dans une portion de la route couverte par un noeud branche, choisissent ce dernier comme relais pour leur trafic.

La structure de chaîne de CBL permet d'introduire plusieurs services de communication. D'abord, il est possible de définir des sens de diffusion de messages (dans le groupe, vers l'amont du trafic, vers l'aval, vers tout le VANET) afin de cantonner l'impact de cette diffusion. Ensuite, elle permet de prendre en charge les quatre modes de communications spécifiés par le standard GeoNetworking (point-à-point, point-à-multipoints, Géoanycast, Géobroadcast). Et enfin, elle réalise autour des noeuds branche la formation de groupes disjoints adaptés au fonctionnement des applications coopératives.

Une description de l'intégration de CBL dans le protocole OLSR a permis de montrer que cette méthode de structuration peut parfaitement s'intégrer à des protocoles de routage existants, pourvu que ces derniers offrent la possibilité d'intégrer un message périodique permettant de découvrir le voisinage direct de chaque noeud. Dans le cas d'OLSR, les modifications apportées aux messages HELLO ainsi que les traitements adaptés afin d'utiliser CBL à partir d'OLSR ont été décrits. Néanmoins, ce cas d'étude présenté avec OLSR ne doit pas restreindre la vision par rapport à une potentielle utilisation de CBL avec d'autres protocoles de routage.

Après cette section consacrée à la conception d'un modèle d'auto-organisation pour les communications véhicule-à-véhicule, je vais montrer comment la modélisation et la simulation ont été utilisées afin de réaliser son évaluation dans la section 2.2.

## 2.2 Modèles et simulation pour l'évaluation des communications

L'évaluation d'un modèle d'organisation à l'échelle d'un réseau véhiculaire pose forcément un problème de taille. Les moyens importants que peuvent nécessiter la mobilisation de l'infrastructure et des véhicules en nombre significatif pour réaliser des tests sur site, imposent de réserver ce mode d'évaluation à des solutions ayant déjà montré un potentiel important par d'autres moyens. Et même dans ces conditions, le résultat est davantage une démonstration opérationnelle plutôt qu'une réelle opportunité d'évaluation et d'analyse permettant de tirer des conclusions sur l'efficacité d'un modèle d'auto-organisation. Même avec un nombre restreint de véhicules et la participation de constructeurs automobiles et de gestionnaires d'infrastructures routières à l'occasion de programmes de recherche européens comme SCOOP [43] et InterCor [44], il n'a pas été possible de mener des évaluations sur site à une échelle significative sur les scénarios de communications véhicule-à-véhicule.

La simulation informatique représente donc une alternative plus simple et plus économique à mettre en œuvre en première phase d'évaluation. Néanmoins, la pertinence des résultats de simulations dépend de la finesse et de la précision des modèles réalisés pour les objets et les phénomènes pouvant affecter les performances dans un VANET. Les environnements de modélisation et de simulation, les modèles mis en œuvre, la nature des contextes routiers ciblés (urbains, autoroutiers) mènent à une littérature abondante en matière de proposition de protocoles et d'évaluation de performances de ceux-ci. Un exposé critique [45] pointe le fait qu'il existe un nombre important de protocoles de routage pour les *Vehicular Ad Hoc Network* (VANET), mais qu'il est impossible de connaître leurs performances relatives puisqu'aucune plate-forme commune d'évaluation n'a été mise en place.

Dans le cadre de la thèse de Lucas Rivoirad [1], nous avons donc considéré la méthodologie suivie pour l'évaluation comme une proposition à part entière qui a fait l'objet d'un chapitre dédié. Construite à partir d'une revue détaillée de la littérature, cette méthodologie est une synthèse des principales approches à tous les niveaux de modélisation. Tous les modèles ainsi que les données produits ont vocation à être partagés afin de contribuer à l'émergence d'une plate-forme commune pour l'évaluation des communications dans les VANETs. Dans cette section, je résume sa thèse sur les modèles et outils nécessaires à l'évaluation d'un protocole de routage, aussi bien au niveau de la structure formée par le protocole que d'un point de vue système.

### 2.2.1 Approches d'évaluation

Selon l'objectif des évaluations menées sur protocole de routage, nous avons synthétisé deux approches :

- **l'évaluation structurelle** : consiste à étudier les performances de la structure formée par un protocole lorsque ce dernier crée une topologie hiérarchique dans le réseau. Dans cette approche, les les couches du modèle *Open Systems Interconnection* (OSI) qui sont en interaction avec la couche réseau supportant le protocole de routage étudié sont idéalisées afin de mettre en évidence essentiellement l'impact de ce dernier. Dans le cas de l'évaluation du schéma CBL qui est indépendant des technologies radio et des applications, seules les modélisations de la mobilité des nœuds et de la portée radio du canal de propagation sont nécessaires. Les résultats d'évaluation attendus ne concernent que les aspects structurels du protocole de routage tels que les types des nœuds (branche ou feuille), le nombre de structures (chaînes) formées ou encore le temps nécessaire à la formation d'une structure.
- **l'évaluation système** : prend en compte l'ensemble des couches (selon la terminologie du modèle OSI) mises en œuvre par le réseau de communication. Ainsi, la modélisation du schéma de *clustering* CBL au sein d'un système de communication pour les VANET nécessite la modélisation de la couche réseau dans lequel le schéma CBL s'intègre, celle des couches supérieures application et transport, qui supportent notamment les profils applicatifs des utilisateurs et la préparation des paquets de données, et celle des couches inférieures, liaison de donnée et physique de la technologie radio. La couche liaison de donnée modélisera en particulier les accès au médium et la couche physique le modèle de propagation.

Par conséquent, outre le choix d'un outil de modélisation et de simulation, il faut proposer une modélisation des applications exécutées dans le VANET, des modèles de propagation, des modèles des technologies radio, une modélisation réaliste de la mobilité des nœuds et des métriques de performances (figure 2.10).

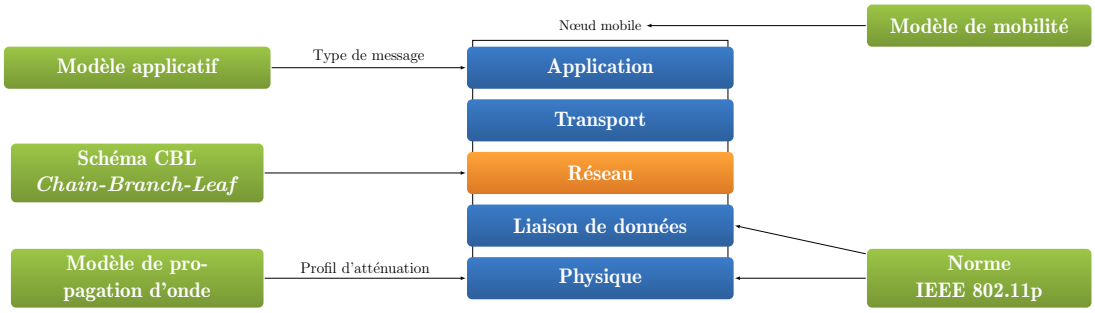



FIGURE 2.10 – Modélisations nécessaires à l'étude de performances de CBL dans un système VANET.

### 2.2.2 Outils de simulation

#### 2.2.2.1 Aperçu des simulateurs courants pour les VANET

Les études [46, 47] réalisent une comparaison très approfondie des simulateurs de réseaux de communication utilisés pour les VANET. Je reprends de la thèse de Lucas les simulateurs de réseau couramment cités dans les études et évaluations des protocoles de routage référencés dans l'état de l'art, ainsi que leurs principales caractéristiques (tableau 2.3).

La mobilité particulière dans les VANET (trajectoires contraintes par les routes, contraintes physiques et réglémentaires sur les mouvements, etc) permet de scinder les simulateurs en deux familles selon qu'ils intègrent ou non la modélisation de la mobilité spécifique des nœuds d'un VANET. Les simulateurs de réseaux simples modélisent uniquement les réseaux de communication et nécessitent donc l'usage de traces de véhicules qui ont été préalablement générées avec un autre outil. On peut citer principalement *Network Simulator* (NS) (NS2 [48] ou NS3) et *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++) [49]. Les simulateurs intégrés comportent en réalité un simulateur pour la modélisation du réseau de communication et un second pour la modélisation des trajectoires des nœuds. On note par exemple *Traffic and Network Simulation Environment* (TraNS) qui intègre NS2 avec le simulateur de mobilité de véhicules *Simulation of Urban MObility* (SUMO) [50], *VEhicule In Network Simulation* (VEINS) qui intègre ce dernier avec OMNeT++ et a été notamment utilisé dans [51] et VSimRTI [22]. L'outil NCTUns [52] intègre un simulateur de réseau ainsi que son propre simulateur de mobilité, utilisés notamment pour évaluer le protocole *clustering based on DIRection in Vehicular Environment* (C-DRIVE) [53].

TABLEAU 2.3 – Simulateurs de communication utilisés dans la littérature

| | Simulateurs | NS2/NS3 [48] | MATLAB [54] | Omnet ++ [49] | OPNET [55] | NCTUns [52] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Caractéristiques | Mobilité intégrée | | | | | ✓ |
| | Développement en cours | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| | Langage | C++/OTCL | C/C++/Java | C++ | C++/Java | C |
| | Multi-plateforme | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| | Licence libre | ✓ | | | | ✓ |
| | Interface graphique | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Animation | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Usage | Prise en main | − | ++ | − | + | − |
| | Exemples fournis | ✓ | | | ✓ | |
| | Installation | + + + | + + + | ++ | + | − |
| | Facilité d'usage | − | + | − | − | − |
| Fonction | Rapidité simulation | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Passage à l'échelle | − | ++ | + | + | ++ |
| | Modèle 802.11p | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |

#### 2.2.2.2 Simulateurs utilisés dans nos travaux

Notre choix s'est porté sur deux outils de développement *Optimized Network Engineering Tools* (OPNET) Riverbed Modeler [55] et *MATrix LABoratory* (MATLAB), du fait de la disponibilité de licences dans le laboratoire d'accueil du doctorant et l'expertise développée sur ces outils par l'encadrement (notamment dans mes travaux de thèse [56] et plus récemment [7]).

OPNET Riverbed Modeler [55] est un logiciel commercial de conception, de modélisation, et d'analyse des réseaux de communication qui propose des modèles validés par la société éditrice du logiciel des protocoles les plus utilisés (OLSR, AODV, *Transmission Control Protocol* (TCP), *User Datagram Protocol* (UDP), *Internet Protocol* (IP), Ether-

net, IEEE 802.11,etc.), et notamment depuis la version 18, une modélisation de l'interface 802.11p. OPNET Riverbed Modeler est un simulateur intégré à événements discrets. Il donne la possibilité de générer manuellement les trajectoires de nœuds ou de faire appel à des modèles de déplacements aléatoires. Il a notamment servi pour la conception et l'évaluation du protocole QOLSR [57] ou encore pour le développement du protocole GeoAODV [58]. Conformément à notre approche méthodologique, nous avons utilisé ce logiciel pour les **évaluations système** sur CBL. Les comparaisons d'évaluation de protocoles [59, 60, 61, 62, 24, 63, 64, 65] font également appel aux modèles fournis par OPNET tels que ceux de OLSR, AODV et GRP. L'intérêt de ces modèles est d'être commun aux utilisateurs d'OPNET Riverbed Modeler.

MATLAB est un environnement de développement et un langage de programmation émulé pour l'analyse des données, le développement d'algorithmes et la création de modèles. Il n'a pas été conçu pour la simulation des environnements des VANET, ni pour l'étude des réseaux de communication. Fortement utilisé dans le monde académique malgré une licence payante, il est avec 4 citations l'outil le plus utilisé après NS pour la modélisation et l'évaluation de performances de protocoles pour les VANET, tels que *Vehicular clustering based on the Weighted Clustering Algorithm* (VWCA) [66], *Particle Swarm Optimization Cluster* (PSO-C) [67] ou encore QoS OLSR [68]. La version R2012b a été utilisé en complément et préalablement à la mise en œuvre du protocole CBL sous OPNET, pour **l'évaluation structurelle** de CBL comparativement à OLSR [69, 24] en réalisant un simulateur simplifié de communication ne prenant en compte que deux aspects. Le premier concerne la mobilité des nœuds et le second concerne la portée de communication qui a été fixée par une distance maximale entre les nœuds.

De plus, MATLAB a été utilisé pour plusieurs tâches présentées dans la figure 2.11. En particulier, il a permis d'afficher des animations pour visualiser la progression des nœuds du réseau. Cette visualisation a notamment aidé à mettre en exergue les différents problèmes cités en section 2.1.2.5. Ces exemples ont montré les limites de la première version de CBL et ont permis de définir des mécaniques de correction pour atteindre la seconde version de CBL présentée dans [41]. MATLAB a également été utilisé pour générer automatiquement les fichiers TRJ, calculés *a posteriori* à partir des fichiers journaux (*log files*) de simulation d'OPNET, le nombre de chaînes formées dans le réseau. Pour finir il nous a été utile pour réaliser les figures de résultats dont l'affichage sous OPNET n'est pas optimal.

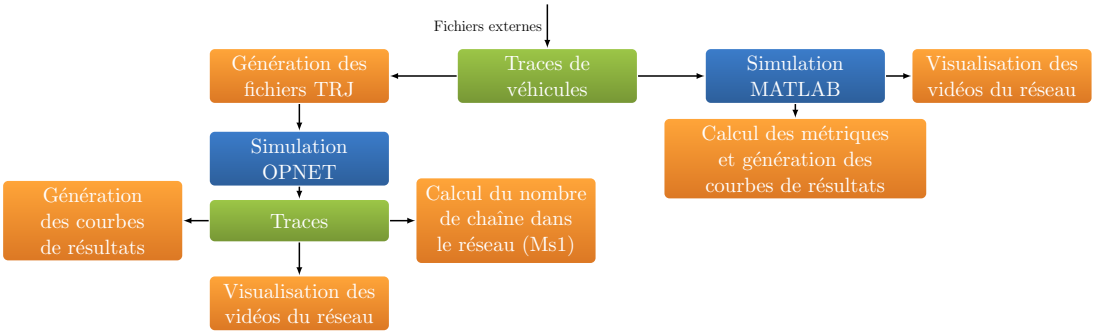



FIGURE 2.11 – Diagramme d'utilisation de MATLAB et OPNET. Les blocs en orange correspondent aux tâches exécutées avec des scripts MATLAB.

### 2.2.3 Modélisation de la mobilité, des transmissions et des applications

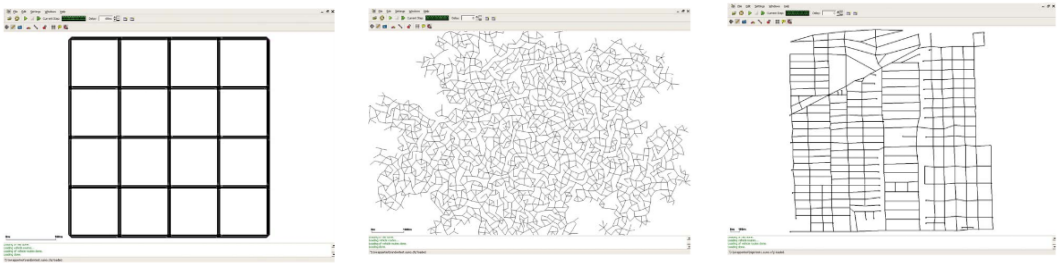
La mobilité ainsi que les transmissions, vues à travers les modèles de propagation, la technologie de communication et le trafic applicatif, sont des révélateurs directs de

la performance d'un modèle d'auto-organisation ou d'un protocole pour les VANETs. Sans revenir sur l'intégralité de l'état de l'art proposé dans [1], je souligne les principaux éléments permettant de mettre en évidence nos contributions.

#### 2.2.3.1 Modélisation de la mobilité

**Les modèles de mobilité existants**

Historiquement, les modèles de mobilité utilisés dans les VANET sont des modèles mathématiques simples conçus pour évaluer des MANET (tel que *Random Way Point* (RWP) utilisé notamment dans [70, 71]). Malgré les améliorations à RWP, notamment par couplage avec des cartes (type "modèle Manhattan"), ou grâce à des modèles stochastiques qui renforcent la cohérence des déplacements d'un véhicule (*Street*-RWP) ainsi que ses interactions avec les autres véhicules (*Freeway Mobility Model* (FDM) [72]), ce type de modèles peinent à réfléter la dispersion significative des valeurs de vitesses au cours du temps et de l'espace observée dans les VANET (figure 2.12).



(a) Carte du type Manhattan (b) Carte aléatoire (c) Carte issue du monde réel

FIGURE 2.12 – Différentes cartes générées par les modèles de type *Street*-RWP - source : [73]

Une alternative aux précédents modèles vient des simulateurs de trafic routier [46, 74]. Les caractéristiques des simulateurs les plus référencés importants sont résumées dans le tableau 2.4. Des présentations détaillées sont respectivement disponibles pour Vanet-MobiSim [75] (utilisé pour les VANET dans [68, 76, 77, 78, 79]), *CORridor SIMulation* (CORSIM) [80] (utilisé dans [81]), *NETwork Simulator for TRaffic Efficiency And Mobility* (NetStream) [82] (utilisé pour évaluer le protocole GVGRID [83]) et NCTUns [84] (déjà présenté et utilisé notamment dans l'évaluation du protocole C-DRIVE [53]).

En particulier, le simulateur *Simulation of Urban MObility* (SUMO) [50] permet la modélisation des systèmes de trafic inter-modaux, y compris les véhicules routiers, les transports en commun et les piétons. Il propose l'importation du réseau routier de manière manuelle, de manière aléatoire ou par l'import d'un réseau routier réel. SUMO est capable de gérer les voies routières multiples, les vitesses maximales par voies, ainsi que les intersections grâce à un système de stop ou de feux de signalisation. Ce simulateur permet également de modéliser plusieurs types de véhicules. Il propose différents algorithmes de poursuite de véhicules, notamment l'algorithme Krauß[85] qui décrit les mouvements de chaque véhicule en fonction des positions et vitesses des véhicules qui se trouvent à proximité. Dans ce modèle, chaque véhicule essaie d'atteindre sa "vitesse désirée" tout en maintenant une distance de sécurité parfaite avec le véhicule à l'avant. Ce simulateur, sous licence libre, est codé en C++, est paramétrable grâce à des fichier XML, comme l'est le

simulateur VanetMobiSim. Depuis 2007, une extension de SUMO nommé MOVE permet de générer des traces de véhicules compatibles avec les logiciels de simulation de réseau de communication. Cce simulateur est le plus utilisé dans les études de protocole de routage dans les VANET [86, 87, 88, 89, 90].

TABLEAU 2.4 – Simulateur de trafic routier microscopique utilisés dans la littérature

| | Simulateurs | VanetMobiSim [75] | CORSIM [80] | SUMO [50] | NetStream [82] | NCTUns [84] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Caractéristiques | Première version | 2006 | 1997 | 2002 | 1997 | 2002 |
| | Version actuelle | 2007 | 2012 | 2017 | 1997 | 2010 |
| | Développement en cours | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Multi-plate-forme | | | ✓ | | |
| | Licence libre | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| | Interface graphique | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Facilité d'utilisation | +++ | + | ++ | − | + |
| Réseau | Carte aléatoire | ✓ | | ✓ | ✓ | |
| | Carte définie par l'utilisateur | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Import carte réel | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Fonctionnalités | Modèle de poursuite | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Multi-voies | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Dépassement | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Contrainte vitesse | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Gestion intersection | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Type de véhicule différents | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |

L'autre source de données est constituée de traces réelles provenant d'enregistrements de données *Global Position System* (GPS) ou d'enregistrements vidéo. La base de données Crawdad [91] fournit plus d'une centaine d'ensembles de traces réelles (GPS) de véhicules de type taxis ou bus pour l'étude des VANET (utilisées notamment dans [38] pour montrer la limitation temporelle des connexions *Vehicle to Vehicle* (V2V) induites par la forte mobilité des nœuds d'un VANET). S'agissant d'enregistrements vidéo, selon [92], deux grands groupes de jeux de données ont été construits depuis l'an 2000 : celles du DTU [93], institution déjà très impliquée dans la modélisation de l'ERTMS (chapitre 1), et les jeux de données *Next Generation Simulation* (NGSim) [94] du programme de l'administration fédérale américaine des autoroutes *Federal Highway Administration* (FHWA). Ces dernières sont publiques, mais non filtrées d'où la méthode de filtrage proposée par [95]. Un troisième jeu de données filtrées a été proposé par [92] suite à des enregistrements dans la région grenobloise d'une zone routière de 500 m, réalisés par voie aérienne à l'aide d'une caméra sur un hélicoptère, à l'occasion du projet PREDIT *Measuring and Modelling Congestion and Pollution* (MOCoPo). Ces données filtrées, permettant de reconstruire les trajectoires des véhicules sur cette zone, ont été utilisées dans [61] pour l'évaluation comparative des performances des protocoles de routage OLSR, AODV, GRP et DSR. Les traces de trajectoires de véhicules issues de l'analyse d'enregistrement vidéo ont pour intérêt de

contenir l'ensemble des véhicules qui ont traversé la section couverte par l'enregistrement. Cependant cette section est de très faible longueur : 500 m pour les données MOCoPo et 1 km pour les données NGSim.

**Contributions à la modélisation de la mobilité**

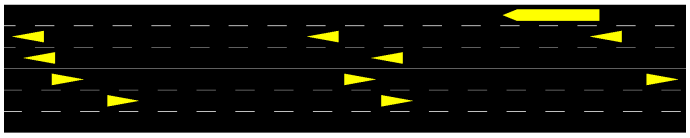
Les modèles stochastiques ne sont pas assez réalistes pour simuler la mobilité des véhicules. Les traces réelles issues de capteurs GPS ou d'enregistrements vidéos ne sont pas encore parfaitement adaptées, car elles contiennent soit insuffisamment de véhicules proches susceptibles de se connecter en réseau (taux de pénétration trop faible de véhicules équipés participant à la collecte), soit elles couvrent une zone de collecte trop restreinte pour observer l'effet de l'auto-organisation sur une distance significative. Préalablement à la thèse, j'avais déjà souligné la nécessité de compenser ces insuffisances, notamment en reconstruisant des traces directement à partir de données sur l'état habituel du trafic dans certaines zones urbaines [60] (données Google Maps par exemple). Un simulateur microscopique tel que SUMO permet de réaliser automatiquement ce type d'opérations pour des densités importantes.

Afin d'obtenir des VANETs de taille significative dans des configurations où l'infrastructure est susceptible d'être inexistant (autoroutes et routes hors zones urbaines), nous avons généré deux types de réseaux routiers différents.

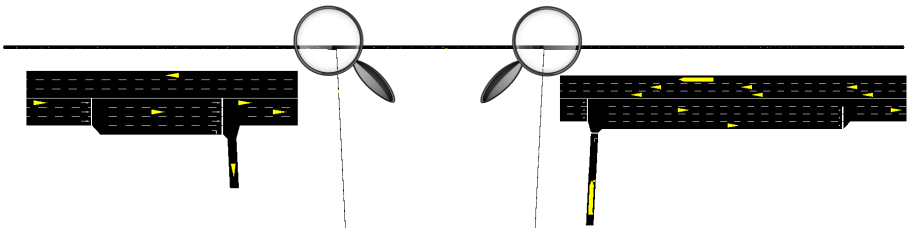
Le premier correspond à des configurations types suivantes :

– R1 : une autoroute à sens unique à trois voies sur 5 km de long ;

– R2 : une autoroute à double sens à trois voies sur 5 km de long ;



– R3 : une autoroute à deux fois trois voies avec une entrée et une sortie d'autoroute. La sortie est située à 1,8 km du début de la section, tandis que l'entrée se trouve à 3 km.



Le second correspond à un réseau réel offrant deux configurations :

– le premier (R4) se compose d'une section de 5 km de l'autoroute A27 et d'une section de 1 km de la départementale RD90 ;

– le second (R5) ne contient que la section de l'autoroute A27.

Cette autoroute relie Lille à la Belgique. La figure 2.13 illustre l'import du réseau A27 issue de Open Street Map grâce à l'outil JOSM dans NETEDIT. Les données ont été

fournies par la Direction Interdépartementale Des Routes (DIR) Nord et sont issues de boucles électromagnétiques placées sous la chaussée.

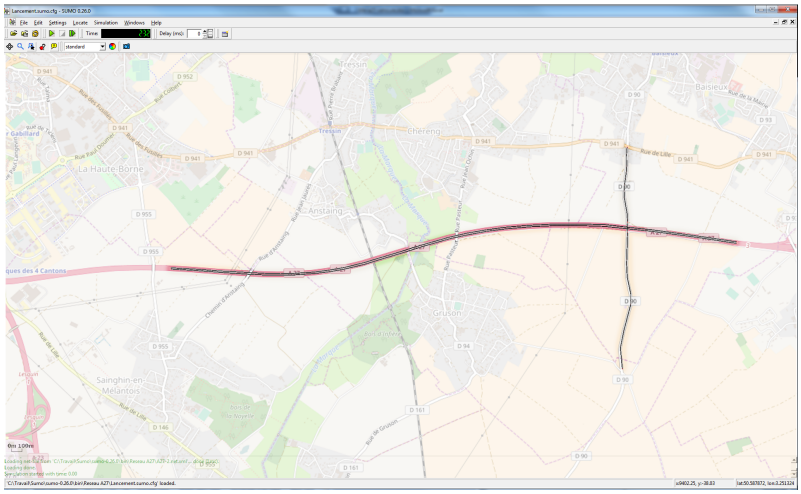


FIGURE 2.13 – Réseau A27 importé dans Netedit

TABLEAU 2.5 – Paramètres utilisés pour le modèle Krauß pour les Véhicules légers (VL) et Poids lourds (PL)

| | Acc | Dcc | L | $\sigma$ | $\tau$ | MG | MS | SF | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Unités | $m/s^2$ | $m/s^2$ | $m$ | - | $s$ | $m$ | $km/h$ | - | - |
| VL | 2 | 3 | 5 | 0,5 | 1 | 2,5 | 150 | 1 | 0,1 |
| PL | 1 | 2 | 15 | 0,5 | 1 | 5 | 130 | 0,84 | 0,1 |

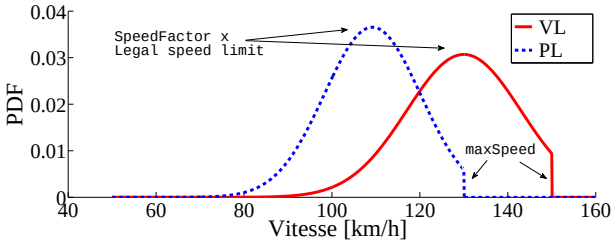



FIGURE 2.14 – Densité de probabilité de la vitesse désirée pour les VL et les PL dans le cas d'une vitesse maximale autorisé à 130 km/h.

Grâce au modèle Krauß [85] implémenté dans SUMO et utilisé avec les paramètres repris dans le tableau 2.5, nous avons pu générer :

- 9 scénarios sur les réseaux R1 à R3 selon les paramètres de trafic routier repris dans le tableau 2.6 ;
- 4 scénarios sur les réseaux R4 et R5 selon les paramètres de trafic autoroutier et routier repris dans le tableau 2.7.

L'utilisation de ces modèles de mobilité n'a posé aucun problème pour l'analyse structurelle sous MATLAB. Néanmoins, concernant l'analyse système, le nombre de noeuds mobiles présents simultanément en simulation étant limité dans OPNET, il nous a fallu résoudre quelques problèmes techniques. Au lancement de la simulation, tous les nœuds attendent dans une zone tampon éloignée du réseau routier. Ces nœuds sont ensuite initialisés lorsqu'ils sortent de la zone tampon. Lorsqu'un nœud a terminé le parcours d'une

TABLEAU 2.6 – Définition des scénarios et de la valeur de la demande de trafic routier

| Densité | Trafic VL *(veh/h/direction)* | Trafic PL *(veh/h/direction)* | R1 | R2 | R3 |
|---|---|---|---|---|---|
| Faible | 500 | 100 | S1 | S4 | S7 |
| Moyenne | 2000 | 400 | S2 | S5 | S8 |
| Haute | 4000 | 800 | S3 | S6 | S9 |

Où S1 à S9 sont les scénarios.

TABLEAU 2.7 – Scénarios et valeurs de densité de trafic

| Scénario | Réseau | | | Densité A27 (veh/h) | | | | Densité RD90 (veh/h) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Sens O-E | | Sens E-O | | Sens O-E | | Sens E-O | |
| | | A27 | RD90 | VL | PL | VL | PL | VL | PL | VL | PL |
| S10 | R4 | ✓ | ✓ | Densité variable | | | | 250 | 0 | 250 | 0 |
| S11 | R5 | ✓ | | Densité variable | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S12 | R5 | ✓ | | 630 | 208 | 1620 | 380 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S13 | R5 | ✓ | | 380 | 260 | 430 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0 |

première trajectoire, il retourne immédiatement dans la zone éloignée du réseau où il est réinitialisé dans un état d'attente. Dès qu'il sortira de cette zone pour parcourir une nouvelle trajectoire, il sera initialisé de nouveau. Cette optimisation a permis de réduire le nombre de nœuds nécessaires au lancement des simulations (tableau 2.8) d'une part et, d'autre part, de ne pas impacter les statistiques des métriques par les émissions des nœuds en attente. Cependant, malgré cette solution, les scénarios S6 et S9 n'ont pu être lancés en raison du nombre élevé de véhicules présents simultanément dans le réseau.

TABLEAU 2.8 – Nombre de nœuds nécessaires à chaque scénario sous Riverbed OPNET Modeler

| Scénario | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de nœuds | 62 | 262 | 567 | 138 | 532 | **999** | 123 | 522 | **1454** | 380 | 328 | 357 | 175 |

#### 2.2.3.2 Modélisation des transmissions

**Modèles de propagation des ondes radio**

Les études de performances [96, 97, 98, 99, 100] montrent que le choix d'un modèle de propagation des ondes radio a un fort impact sur les évaluations de performances des protocoles de routage. Sans refaire un état de l'art déjà disponible notamment dans [101], je reviens sur les grandes lignes qui montrent comment nous avons pris en compte la propagation dans nos travaux. Une présentation détaillée est disponible dans la thèse de Lucas Rivoirard [1].

L'onde radio est une onde électromagnétique qui interagit avec son environnement de propagation, ce qui rend difficile une modélisation de la réalité de terrain. La propagation de cette onde électromagnétique est en effet sujette à un phénomène d'affaiblissement (*path-loss*) fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur et causé par la dispersion de sa puissance dans l'espace. En plus de cet affaiblissement, l'onde subit une atténuation (aussi appelée *large scale fading*) lors de sa rencontre avec des obstacles amenant à la création de zones d'ombre (*shadowing*), par exemple causées par des dispersions du signal sur

un feuillage, des réflexions du signal sur le sol ou des bâtiments, des réfractions du signal sur des bâtiments. Enfin, la puissance de l'onde mesurée à sa réception montre des fluctuations rapides (appelées *small scale fading*) dues au retard induit par des multi-trajets et par l'effet Doppler. Le tableau 2.9 présente une synthèse de modèles de propagation : les modèles déterministes d'atténuation en espace libre (*Free-Space Path-Loss Model* ou *Unit-Disc*) et à deux rayons (*Two-Ray*), d'une part et les modèles probabilistes à zones d'ombre (*Probabilistc Shadowing Model*) et Nakagami, d'autre part. Les formules mathématiques qui relient la puissance émise par un nœud à celle reçue par un autre, en fonction de chacun de ces modèles sont disponibles notamment dans [102, 103].

Le modèle d'atténuation en espace libre (*Free-space*), très couramment utilisé pour l'étude des VANET, simule le cas où les deux nœuds, émetteur et récepteur, sont en visibilité directe (*Line of Sight* (LOS)). Il repose sur l'hypothèse d'une relation inversement proportionnelle au carré de la distance entre la puissance reçue et celle émise et considère qu'en-dessous d'un seuil minimal de puissance de réception, le nœud récepteur n'est plus en capacité de décoder les signaux transmis. Le modèle de propagation à deux rayons (*Two-ray*), choisi par [104, 67, 87, 70] pour l'évaluation de protocoles de routage, considère à la fois le signal LOS et le signal réfléchi par le sol. Les auteurs de [105] recommandent l'utilisation du modèle à deux rayons pour une distance $d$ importante ($d > d_c$) entre les deux nœuds. Et à faible distance ($d < d_c$), où ce dernier est mauvais, le modèle *Free-Space* est employé.

Le modèle probabiliste à zones d'ombre (*Probabilistc Shadowing Model*) prend en compte la variabilité temporelle de la puissance modélisant par une approche stochastique les multi-trajets et les phénomènes de *fading*. La fonction mathématique de ce modèle à deux parties comporte deux paramètres, $\beta$ et $\theta$, calculés de manière empirique en fonction de l'environnement. La première partie du modèle considère en effet la moyenne de la puissance reçue en fonction du ratio entre la distance et les deux nœuds (émetteur et récepteur) et une distance de référence, ratio exprimé par une fonction puissance et un coefficient $\beta$ dont l'objectif est de déterminer la rapidité de la décroissance de la puissance reçue. La deuxième partie considère une variable aléatoire de loi gaussienne, de moyenne nulle et de variance $\theta$. Selon [99], les valeurs typiques de $\beta$ sont comprises entre 2, pour un environnement ouvert, et 2,7 à 5, pour un environnement urbain ; celles de $\theta$ sont généralement comprises entre 4 et 12. Le modèle probabiliste Nakagami, qui n'a été utilisé que récemment pour l'évaluation de performances des protocoles de routage [106, 107, 108, 109], modélise de façon plus réaliste le comportement des ondes. Ajoutant deux seuils de distance au précédent modèle, il applique des paramètres $\beta$ et $\theta$ différents en fonction de la distance qui sépare deux nœuds.

Plusieurs études soulignent la nécessité de choisir un modèle de propagation adapté au milieu routier dans lequel évoluent les véhicules (autoroutier, urbain ou rural) [102, 115]. En particulier, [103] propose de s'appuyer sur des tests terrain pour modéliser la propagation des signaux dans chaque environnement. Des méthodes de mésures et leur analyse sont notamment proposées dans [110, 111, 113], dont [112] qui prend en compte l'impact des véhicules voisins sur la propagation des signaux. En particulier, le modèle proposé par [114] s'appuie sur une campagne de mesures menée sur autoroute et en milieu urbain dans le sud de la Suède entre les villes de Lund et Malmö avec des véhicules équipés d'antennes omnidirectionnelles placées sur le centre du toit des véhicules. Plusieurs routes ont été parcourues avec des environnements différents en termes de densité de trafic et d'environnements routiers (obstacles, immeubles...). Avec le recueil des mesures expérimentales, les auteurs de [114] ont proposé de distinguer les signaux reçus en ligne

TABLEAU 2.9 – Modélisation de la propagation des signaux dans les VANETs

| | Modèle | Type d'analyse | | Contexte de propagation | | | | Environnement adapté | | | Modèle calibré avec des mesures | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Modèle | Mesure | LOS | NLOS | OLOS | Fadding | Autoroute | Urbain | Rural | Free Space | Two Rays | PSM | Nakagami | Autre |
| Général | Espace libre | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | | | |
| | Two Rays | ✓ | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | |
| | PSM | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | |
| | Nakagami | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | | |
| VANET | [110] | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | |
| | [111] | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | |
| | [112] | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | A |
| | [113] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | R | AU | | |
| | [114] | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | AUR | |

A : Autoroute, U : Urbain, R : Rural.

directe et ceux reçus en ligne directe obstruée, ou partiellement obstruée par un véhicule voisin (*Obstructed Line of Sight* (OLOS)). Les auteurs ont proposé deux paramétrages différents d'un modèle doubles pentes (*dual-slope*) pour décrire les données expérimentales, un pour le cas urbain et un autre pour le cas autoroutier. Celui adapté à l'environnement autoroutier est présenté en figure 2.15. Les mesures pour le cas de ligne directe LOS sont représentées par des points bleus tandis que ceux du cas OLOS sont en vert. Le modèle pour le cas LOS correspond à la courbe noire tandis que la courbe rouge représente celui pour le cas OLOS. On remarque qu'aucune mesure n'a été enregistrée pour le cas OLOS pour une distance entre l'émetteur et le récepteur inférieure à 80 m. En effet pour que le cas OLOS se produise il faut qu'un autre véhicule se place entre l'émetteur et le récepteur ce qui est rare sur autoroute lorsque l'émetteur et le récepteur sont à moins de 80 m de distance.

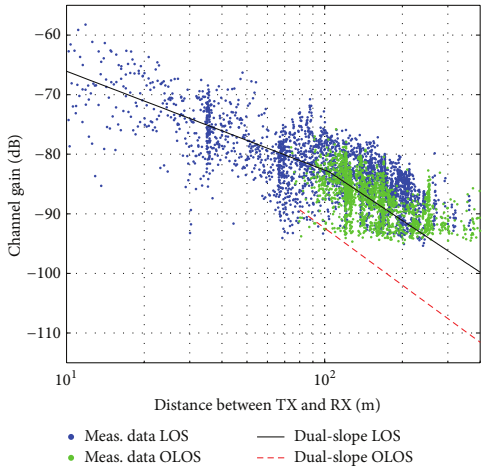



FIGURE 2.15 – Puissance mesurée en environnement autoroutier et modèles associés [114]

En conclusion, la complexité des phénomènes de propagation des ondes radio a mené

à la création de différents modèles (tableau 2.9). La variété des configurations routières (infrastructures, mobilité, densité de véhicules, etc.) est telle qu'il est nécessaire d'effectuer des campagnes de mesures d'envergure pour établir des profils de propagation pertinents pour chaque type de route et en fonction du trafic réel qui y est observé. A la difficulté de mettre en œuvre une telle campagne de mesures, s'ajoute celle d'un parc automobile encore insuffisamment connecté. En attendant ces évolutions, nous avons choisi d'utiliser deux modèles de propagation :

- le modèle de propagation en espace libre : actuellement très utilisés dans les études d'évaluation de protocoles de routage pour les VANET. Il est simple à mettre en œuvre. La portée de transmission est son seul paramètre à régler. De plus, l'étude [116] montre que le modèle *Two-Ray* n'est pas adapté à l'étude d'IEEE 802.11p, car la portée maximale mesurée de cette technologie [117] n'atteint jamais la distance $d_c$ de 886,6 m à partir de laquelle *Two-Ray* pourrait compléter *free-space*.
- le modèle de propagation [114] construit à partir de mesures sur autoroute ; ce modèle prend en compte les effets de masquage partiel (OLOS) du signal en présence de véhicules intermédiaires. Le seuil de réception est son seul paramètre à régler.

Le modèle de propagation d'ondes, implanté par défaut sous OPNET, est celui d'atténuation en espace libre. Les paramètres utilisés sous OPNET Riverbed Modeler sont repris dans le tableau 2.10. La puissance a été fixée à 0,005 W et le seuil de réception à -95 dBm permettant ainsi d'obtenir une portée maximale de 500 mètres qui correspond à celle attendue par la technologie WIFI 802.11p.

TABLEAU 2.10 – Configuration des nœuds dans OPNET

| Attributs | Valeur |
|---|---|
| Fréquence minimale | 5,855 GHz |
| Bande passante | 10 Mhz |
| Puissance de transmission | 0,005 W (i.e. 7 dBm) |
| Seuil de réception | -95 dBm |
| Portée maximale | 500 m |

Le second modèle utilisé [114] est ainsi mis en œuvre. La figure 2.16 fournit la valeur du seuil de la puissance reçue pour lequel la portée de communication est égale à 500 m dans le cas LOS (courbe bleue) : -85 dBm. Afin de garder la configuration initiale des noeuds, la prise en compte de ce second modèle a été réalisée par programmation dans le modèle du processus CBL développé, donc au niveau de la couche réseau [1].

**Modélisation de la technologique de transmission de trames**

Le fonctionnement du schéma de *clustering* CBL qui se greffe dans un protocole de routage, est indépendant des couches physique et liaison de données de la technologie radio utilisée. La structure "dynamiquement stable" construite par CBL ne prend en effet en compte que l'invariant de la portée radio de la technologie employée. Cependant, une évaluation complète du protocole dans des conditions proches du terrain peut être réalisée pour chaque technologie sous-jacente.

Le modèle IEEE 802.11p est actuellement le seul standard conçu pour les VANET qui permet une communication directe entre véhicules. Certes, la version 13 de la technologie *Long Term Evolution* (LTE) défendue par l'Europe permet également des communications *Device-to-Device* (D2D), mais à un saut, et réservées à des fins de sécurité publique, d'une

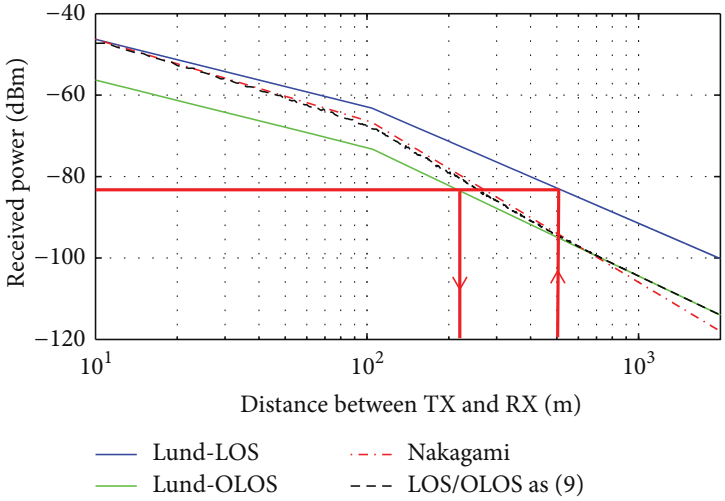



FIGURE 2.16 – Puissance moyenne reçue pour le modèle LOS/OLOS et le modèle Nakagami [114]

part et sous coordination d'une borne statique appelée eNodeB pour l'obtention d'un accès au médium. Dans la version commerciale du LTE, seule la phase de découverte du D2D est autorisée et les communications directes sans intervention d'un eNodeB ne sont pas possibles. La technologie 5G à venir a pour vocation d'être plus flexible et de permettre à terme les communications véhicule-à-véhicule ([118]).

En attendant, notre choix s'est donc porté sur la technologie IEEE 802.11p. Nous avons utilisé pour l'ensemble des simulations réalisées sous OPNET Riverbed Modeler le modèle IEEE 802.11p disponible avec la licence WIRELESS d'OPNET Riverbed Modeler.

La norme 802.11p distingue quatre catégories d'accès correspondant chacune à un type de trafic : AC0 qui donne une priorité *background* quand le trafic est faible, AC1 qui donne une priorité appelée *best-effort* aux applications standards, AC2 pour une priorité à la vidéo (*video*) et AC3 pour une priorité donnée à la voix (*voice*) [119]. En fonction de la catégorie, les valeurs de certains paramètres sont modifiées [120] (tableau 2.11).

| Catégorie | $CW_{min}(AC)$ | $CW_{max}(AC)$ | AIFSN(AC) | $T_{AIFS}(AC)(\mu s)$ |
|---|---|---|---|---|
| AC0 | $aCW_{min} = 15$ | $aCW_{max} = 1023$ | 9 | 149 |
| AC1 | $aCW_{min} = 15$ | $aCW_{max} = 1023$ | 6 | 110 |
| AC2 | $(aCW_{min} + 1)/2 - 1 = 7$ | $aCW_{min} = 15$ | 3 | 71 |
| AC3 | $(aCW_{min} + 1)/4 - 1 = 3$ | $(aCW_{min} + 1)/2 - 1 = 7$ | 2 | 58 |

TABLEAU 2.11 – Valeur des paramètres de la couche MAC du protocole 802.11p en fonction de la catégorie d'accès

Lorsque la communication s'effectue en mode *unicast*, le nœud destinataire doit émettre en retour de la bonne réception de la trame un accusé de réception (trame *Acknowledgment* (ACK)). Si le nœud source ne le reçoit pas, il augmente de deux la largeur de sa fenêtre de contention de $CW(AC)$ avant de tirer une nouvelle valeur aléatoirement *backoff* avant de retenter l'émission de la trame perdue. À l'initialisation, $CW(AC)$ a pour valeur $CW_{min}(AC)$ (avec $aCW_{min} = 15$) qui est fonction du type de trafic. La valeur de $CW(AC)$ est plafonnée par $CW_{max}(AC)$ (avec $CaW_{max} = 1023$).

La configuration utilisée pour 802.11p au niveau des noeuds dans OPNET a été présentée précédemment (tableau 2.10). Seul le premier canal de 10 Mhz de la bande de fréquence

(5,855 - 5,925 GHz) alloué en Europe par ETSI est utilisé. Le débit de transmission est fixé à 12 Mbits/s et les messages de routage sont envoyés en catégorie d'accès AC0. Les messages applicatifs sont transmis en catégorie d'accès AC1.

#### 2.2.3.3 Modélisation des applications

L'état de l'art proposé dans [121] classe les applications *Intelligent Transportation System* (ITS) en trois catégories (figure 2.17) :

- confort : notamment les applications de divertissement via l'accès Internet (musique, jeux, news, etc) et d'informations liées au déplacement (parking, sites touristiques, etc) ;
- optimisation du trafic : visent à améliorer les conditions de circulation dans le but de réduire les embouteillages, la pollution et le respect des signalisations (feux, panneaux, etc).
- sécurité : classées en trois catégories, représentées en figure 2.18, en fonction du délai restant avant un probable accident à compter de leur date d'activation [122], on distingue les applications de sécurité passive de l'ordre de la minute (état de la chaussée, présence d'obstacles, etc), active de l'ordre de la seconde et du milliseconde (maintien dans la voie, freinage d'urgence, conduite coopérative, etc) et post-accident (appel de détresse, etc).

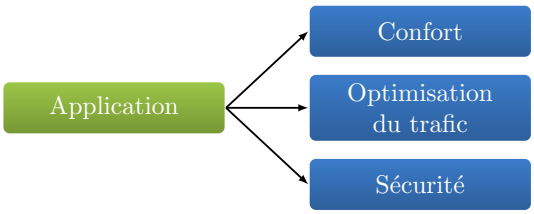



FIGURE 2.17 – Taxonomie des applications ITS dans les VANETs

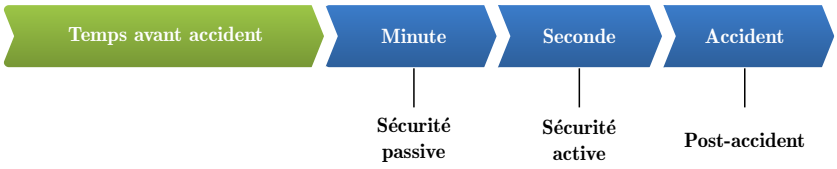



FIGURE 2.18 – Ordonnancement temporel des actions de sécurité dans les ITS

Ces différentes applications de sécurité (passive, active et post-accident) peuvent nécessiter des communications V2V, *Vehicle to Infrastructure* (V2I) ou *Infrastructure to Vehicle* (I2V). Le tableau 2.12 issu de [123] donne le type de communication requise (*i.e.* quel V2X) pour un ensemble d'applications de sécurité relatives à l'évitement de collision en intersection, à la sécurité publique, à l'extension de la signalisation ou encore nécessitant des informations en provenance d'autres véhicules. Pour chacune des applications listées, les besoins en termes de périodicité de transmission (transmission périodique ou événementielle), l'ordre de grandeur en millisecondes du délai de latence attendue entre la transmission de l'information et la prise en compte de l'information transmise et la portée maximale de la communication sont notifiés. D'autres exemples de la littérature définissent les exigences en communication d'applications. L'étude [124] par exemple spécifie une application d'information sur le trafic nécessitant un délai de transfert de messages inférieur

à 100 ms. Dans une étude plus récente, [125] précise que les applications de conduite coopérative ont besoin d'un délai de bout en bout inférieur à 5 ms. Les organismes de normalisation ETSI et IEEE proposent dans [126] d'utiliser un trafic applicatif d'une fréquence de 2 Hz avec des paquets de 800 bits (ETSI) et d'une fréquence de 10 Hz avec des paquets de 300 bits (IEEE).

Modéliser une application à évaluer dans le contexte véhiculaire consiste donc à définir le type de communication à mettre en œuvre, le mode de communication (*broadcast*, *unicast*...), la taille et la fréquence d'envoi des messages applicatifs, enfin les délais maximaux de bout-en-bout autorisés par l'application. Trois applications et leurs besoins de communication ont ainsi été modélisés dans la thèse de Lucas Rivoirard [1] et ont été ensuite détaillées et utilisées pour l'évaluation de CBL-OLSR dans les travaux référencés ci-dessous :

- une application utilisant des besoins applicatifs standardisés par l'IEEE [1] ;
- une application de localisation distribuée coopérative [65, 3] ;
- une application de perception élargie [127, 3].

TABLEAU 2.12 – Besoins en communication des applications de sécurité véhiculaires – source : [128]

| | Application | Type | | | Informations à transmettre | | | | | | | | | | | | | | | Latence (ms) | Portée (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Véhicules | | | | | | | | Infrastructure | | | | | | | | |
| | | V2V | V2I | I2V | ID | Position | Distance | Vitesse | Acc/Decc | Détection | Clignotant | Airbag | Panneaux | Feux | Tracé | Condition | Position | Périodique | Événementiel | | |
| Évitement de collisions | Avertissement de violation du code de la route | | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽250 |
| | Aide pour tourne-à-gauche | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ∼100 | ⩽300 |
| | Aide pour stop | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽300 |
| | Évitement de collisions | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | ∼100 | ⩽300 |
| | Avertissement masquage de véhicules | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽200 |
| | Avertissement de traversée de piétons | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽200 |
| Informations des autres véhicules | Évitement de collisions coopératif | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽150 |
| | Freinage d'urgence | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | ∼100 | ⩽300 |
| | Aide à l'insertion sur autoroute | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽250 |
| | Détection d'angle mort | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽150 |
| | Détection de pré-accident | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ | ∼20 | ⩽50 |
| | Priorité aux TC | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | | ✓ | ∼20 | ⩽50 |
| | Conduite en convoi | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | ∼20 | ⩽100 |
| | Régulateur de vitesse adaptatif | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | | ✓ | | ∼100 | ⩽150 |
| SP | Avertissement de véhicules d'urgence | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | | ∼1000 | ⩽1000 |
| | Avertissement post-accident | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | | | | ✓ | ∼500 | ⩽300 |
| Sign. | Affichage dans le véhicule | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | ∼1000 | ⩽200 |
| | Avertissement de virages | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ∼1000 | ⩽200 |
| | Zone de chantier | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | ∼1000 | ⩽300 |

SP : Sécurité publique, Sign : Signalisation, TC : Transports en communs

## 2.3 Evaluation de CBL-OLSR et principaux résultats

De nombreuses évaluations menées à la fois sur la structure réalisée par le modèle d'organisation CBL, puis en comparaison avec celle obtenue dans OLSR avec les Multipoints relais (MPR), ainsi que leur impact à la fois sur le trafic de routage et sur la performance fournie aux flux applicatifs sont disponibles dans la thèse de Lucas Rivoirard [1] ainsi que dans nos diverses publications. L'objectif de cette section est de donner un aperçu sur les principaux résultats obtenus à travers ces travaux.

### 2.3.1 Evaluation structurelle comparative de CBL-OLSR et MPR-OLSR

J'ai choisi de présenter dans cette section une partie des résultats publiés dans l'article [2] qui porte justement sur la comparaison entre CBL-OLSR et MPR-OLSR. L'idée n'est pas tant la comparaison avec OLSR, mais plutôt un point d'appui pour expliquer comment opère l'organisation de CBL dans la structuration du réseau et en quoi elle est prometteuse. Pour cette partie de l'évaluation réalisée sous MATLAB, seul le trafic de messages HELLO est modélisé. Les nœuds ont été paramétrés pour envoyer un message HELLO toutes les secondes. Le seuil *Vtime* est réglé à 3 secondes, le modèle de propagation en espace libre est utilisé et la portée de transmission maximale a été fixée à 500 mètres. Enfin, le type de routes et les scénarios correspondent à ceux définis en section 2.2.3.

Afin de réaliser cette évaluation structurelle comparative entre CBL-OLSR et MPR-OLSR, quinze métriques structurelles (Ms) sont introduites et définies comme suit :

- Ms1 (Leaf/Vanet) : nombre de noeuds feuille dans le VANET
- Ms2 (NB_Chains) : nombre de chaînes dans le VANET
- Ms3 (Branch/Chain) : nombre de noeuds branche formant une même chaîne
- Ms4 (one-hop/Node) : nombre moyen de voisins à un saut d'un noeud et évoluant dans le même sens de circulation que lui
- Ms5 (Leaf/Branch) : nombre moyen de noeuds feuille rattachés au même noeud branche
- Ms6 (Branch_time) : durée moyenne pendant laquelle un même noeud conserve le statut de branche
- Ms7 (Leaf_time) : durée moyenne pendant laquelle un noeud feuille reste rattaché au même noeud branche
- Ms8 (Branch/Node) : nombre moyen de noeuds branche sélectionnés par chaque noeud du VANET
- Ms9 (Branch/Broadcast) : nombre moyen de noeuds branche impliqués dans la diffusion d'un flux broadcast
- Ms10 (Non_MPR/Vanet) : nombre de noeuds n'ayant pas le statut de MPR
- Ms11 (Nodes/MPR) : nombre moyen de noeuds ayant sélectionné le même MPR (taille du MPR selector set)
- Ms12 (MPR_time) : durée moyenne pendant laquelle un noeud conserve le statut de MPR
- Ms13 (NToMPR_Time) : durée moyenne pendant laquelle un noeud reste rattaché au même MPR
- Ms14 (MPR/Node) : nombre moyen de MPR sélectionnés par un même noeud (taille du MPR set)

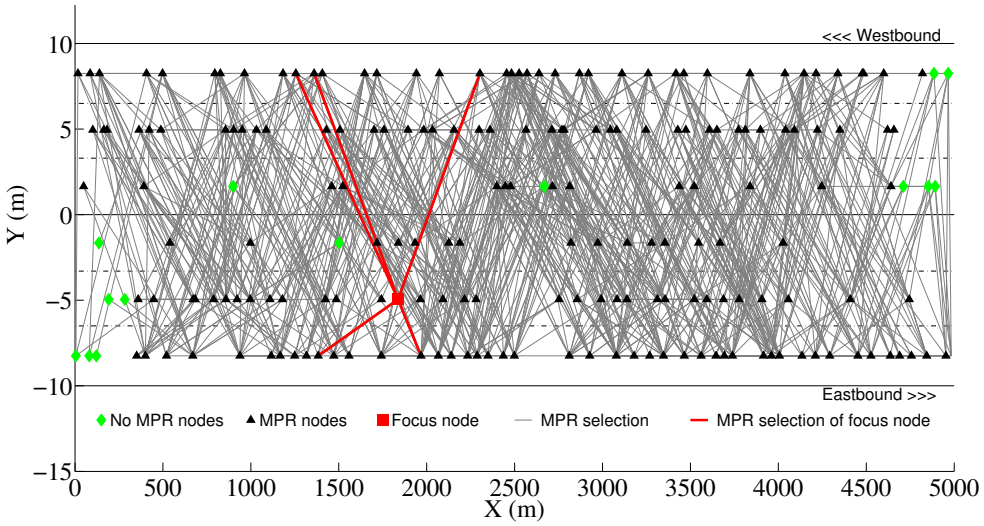
TABLEAU 2.13 – Valeurs moyennes des résultats dans tous les scénarios pour CBL-OLSR et MPR-OLSR

| Network | R1 | | | R2 | | | R3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | S1 | S2 | **S3** | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 |
| Density | - | + | ++ | - | + | ++ | - | + | ++ |
| Node | 25 | 102 | **198** | 50 | 205 | 369 | 46 | 189 | 390 |
| Nombre de chaînes visé par CBL dans le VANET | 1 | 1 | **1** | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| Ms2 (nombre de chaîne dans le VANET) | 1.65 | 1.96 | **2.04** | 3.29 | 2.68 | 3.63 | 3.36 | 6.36 | 9.29 |
| Ms3 (nombre de noeuds branche par chaîne) | 13.7 | 15.9 | **18.9** | 12.1 | 20.4 | 17.8 | 9.4 | 10.4 | 11.3 |
| Ms1 (% de noeuds feuille) | 28 | 76 | **85** | 25 | 77 | 84 | 46 | 67 | 76 |
| Ms10 (% de noeuds non MPR) | 22.1 | 7.4 | **10.2** | 6.9 | 6.5 | 7.5 | 11.5 | 7.8 | 8.0 |
| Ms4 (nombre de voisins à un saut) | 3.9 | 18.8 | **38.6** | 4.8 | 21.2 | 38.2 | 4.1 | 17.7 | 37.8 |
| Ms5 (noeuds feuille rattachés à une même branche) | 1.94 | 4.75 | **7.03** | 1.94 | 4.89 | 6.84 | 2.31 | 3.43 | 4.42 |
| Ms11 (noeuds ayant sélectionné le même MPR) | 3.0 | 6.8 | **9.0** | 5.6 | 11.2 | 13.9 | 5.1 | 10.8 | 14.3 |
| Ms8 (nombre de branches liées à un noeud) | 1.60 | 1.20 | **1.13** | 1.62 | 1.20 | 1.14 | 1.41 | 1.26 | 1.20 |
| Ms14 (nombre de MPR choisis par un noeud) | 1.8 | 3.30 | **3.3** | 3.0 | 5.2 | 6.2 | 2.8 | 5.2 | 6.7 |
| Ms9 (Branches impliquées dans un broadcast) | 17.6 | 24.1 | **29.5** | 36.9 | 47.8 | 56.6 | 25.3 | 61.5 | 94.1 |
| Ms15 (MPR impliqués dans un broadcast) | 13.9 | 66.9 | **118** | 37.2 | 176 | 317 | 31.4 | 156 | 308 |
| Ms6 (durée en tant que branche en s) | 64.4 | 71.9 | **70.0** | 65.1 | 73 | 73.5 | 59.4 | 53.6 | 57.7 |
| Ms12 (durée en tant que MPR en s) | 39.1 | 41.6 | **34.6** | 53.4 | 53.8 | 53.7 | 43.9 | 48.3 | 50.7 |
| Ms7 (durée rattachement feuille-branche en s) | 18.8 | 20.6 | **21.3** | 15.6 | 22.5 | 22.6 | 8.6 | 23.8 | 16.5 |
| Ms13 (durée rattachement noeud à MPR en s) | 29.0 | 13.0 | **9.4** | 10.9 | 8.0 | 6.6 | 10.1 | 8.4 | 6.0 |

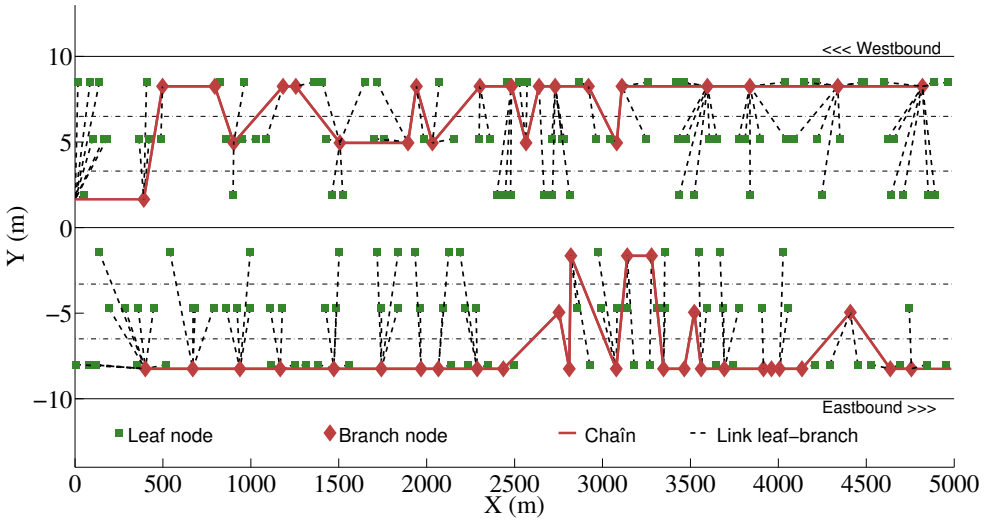
– Ms15 (MPR/Broadcast) : nombre moyen de MPR impliqués dans la diffusion d'un flux broadcast

Un instantané du VANET montre clairement que l'organisation mise en oeuvre par la technique des multipoints relais (MPR), conçue initialement pour des espaces ouverts, n'est pas optimisée pour la route (Fig. 2.19a). Pratiquement tous les noeuds du réseau sont MPR pour quelques autres, ce qui implique un grand nombre de noeuds générant des messages de contrôle de topologie (TC) et participant à leur retransmission. De plus, plusieurs noeuds sont connectés avec des noeuds évoluant dans le sens de circulation opposé sans que cela soit toujours pertinent. Au même instant de la simulation, l'organisation imposée par CBL réalise deux chaînes séparées (Fig. 2.19b), une dans chaque sens de circulation, introduisant ainsi un premier niveau de cloisonnement (qui n'exclut pas la possibilité de désigner des passerelles entre les deux sens de circulation). Le nombre de noeuds branche est largement inférieur au nombre de noeuds MPR, ce qui aura un impact certain sur la génération et la retransmission des messages TC. Les résultats détaillés pour tous les scénarios de S1 à S9 sont repris dans le tableau 2.13. Les métriques ne sont pas présentées dans l'ordre de leur numérotation, mais regroupées pour faciliter la comparaison. Je ne présenterai de manière détaillée que certains résultats de S3 qui est le réseau de plus forte densité lorsqu'on ne considère qu'un seul sens de circulation (R1 : route à trois voies dans un seul sens de circulation).

Plus de la moitié du temps, il n'y a qu'une seule chaîne stable connectant tous les noeuds branche (Fig. 2.20). Les ruptures de connections, les périodes de changement de choix de branche et tous les aléas pouvant conduire à une rupture de chaîne, n'impactent cette stabilité que moins de la moitié du temps. La figure 2.21a montre que malgré ces




(a) Etat des connexions entre les noeuds du VANET et leurs noeuds MPR (focus sur un noeud particulier)




(b) Etat des connexions dans la structure créée par CBL, une chaîne dans chaque sens de circulation

FIGURE 2.19 – Structures réalisées par MPR et CBL dans le scenario S5 à la date T=500s [2]

ruptures, chaque composante connexe contient tout de même au moins une dizaine de noeuds branche et donc à peu près le tiers du VANET (par exemple en Fig. 2.21a pour le scenario 3), ce qui représente déjà un regroupement intéressant. Les ruptures de chaînes sont plus fréquentes lorsque la route comporte des voies d'insertion et de sortie (résultats Ms3 pour la configuration R3 dans le tableau 2.13). Il serait intéressant d'associer ces résultats avec une observation de la durée moyenne (ou maximale) pendant laquelle une rupture de chaîne persiste pour pouvoir les interpréter en termes perte de connectivité dans le VANET. Cela fait partie des tâches en cours dans nos travaux.

Un examen approfondi du tableau 2.13 montre que la réduction du nombre de noeuds branche est moins efficace (moins de 50% de noeuds feuille, donc plus de 50% de noeuds branche - métrique Ms1) dans les scénarios de faible densité (S1, S4 et S7). Ce résultat est cohérent avec l'organisation de CBL dont la stratégie est davantage tournée vers une couverture maximale de la route que vers la réduction drastique du nombre de relais. En effet, si 10 noeuds circulaient en ligne sur une voie de 5 km à une distance de 450 m les uns

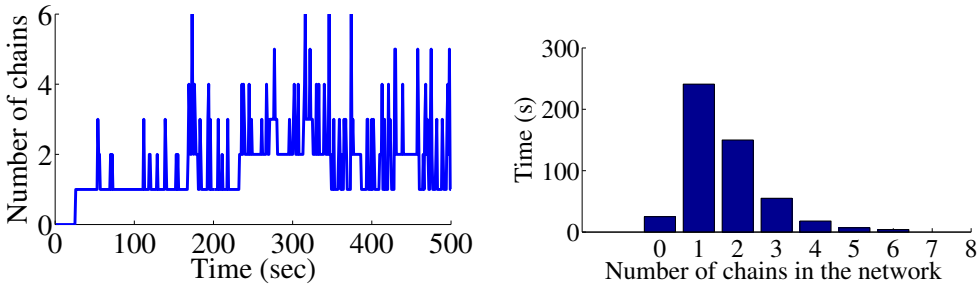
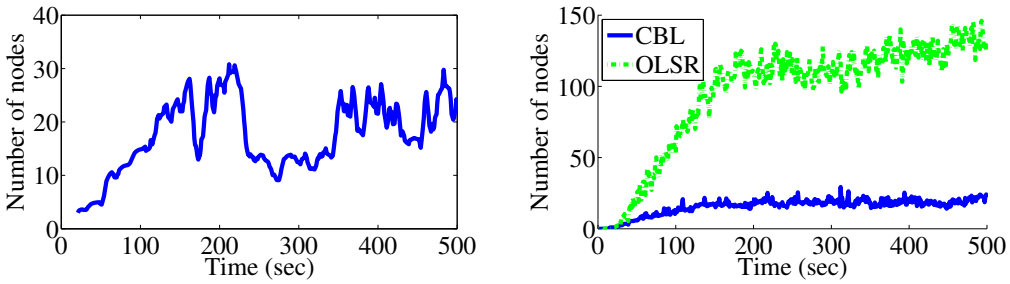



FIGURE 2.20 – Nombre de chaînes dans le temps et durées accumulées associées (scenario 3) [2]

des autres, avec l'organisation de CBL, ils seraient tous des noeuds branche. En revanche, si on ajoutait dans ce même scénario 200 noeuds répartis un peu partout sur la chaussée, il n'y aurait toujours qu'approximativement 10 noeuds branche. En effet, chaque portion de la section de route étant déjà couverte par au moins un noeud branche, il n'y aurait pas besoin d'en élire de nouveaux, un peu comme si une infrastructure de RSU (Road Side Units virtuels) était en place. Cette observation montre en même temps la capacité de passage à l'échelle de CBL.



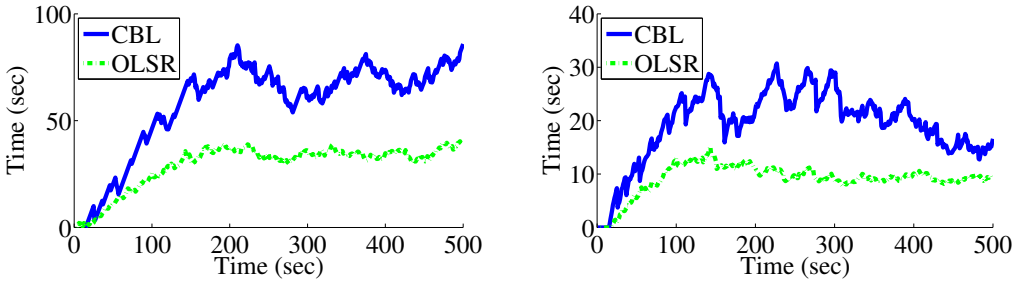

(a) noeuds branche par chaîne (b) nombre de relais impliqués dans un broadcast

FIGURE 2.21 – Noeuds branche par chaîne (Ms3) et relais impliqués dans un broadcast (Ms7/Ms13) dans le scenario 3 [2]

Le nombre moyen de voisins à un saut est logiquement identique pour CBL-OLSR et MPR-OLSR, car les deux protocoles suivent le même processus de découverte du voisinage et au même rythme. Il est possible de faire des interprétations plus ou moins favorables à l'un des protocoles en se basant sur les valeurs des métriques reprises dans le tableau 2.13. Des discussions détaillées sont proposées dans [1, 2]. J'estime qu'en plus des observations faites ci-dessus, il y a principalement trois conclusions qui peuvent être tirées de manière univoque :

– l'organisation imposée par CBL génère une dorsale (backbone) nettement plus stable que celle réalisée par les multipoints relais. La figure 2.22a montre clairement qu'un noeud branche conserve le statut de relais presque deux fois plus longtemps qu'un multipoint relais lorsque la configuration de la route induit un trafic stable (sans voies transversales comme R1 et R2). La seule configuration qui nuance ce résultat concerne les scénarios sur la route R3 où la présence de voies d'insertion et de sortie supprime le caractère longitudinal de la route. Dans ces conditions, également caractéristiques des routes en agglomération, je postule que le maillage offert par les MPR pourrait davantage concurrencer les performances offertes par CBL. Une étude est prévue dans nos travaux en cours pour le vérifier.

– la dorsale réalisée par CBL offre un service de retransmission et de routage plus stable que le maillage réalisé par les MPR, car les noeuds feuille restent presque deux fois plus longtemps rattachés au même noeud branche que les MPR selectors à leur MPR (Fig. 2.22b). Contrairement à la durée moyenne d'un relais qui était liée à la configuration de la route, la durée de rattachement noeud-relais est davantage impactée par la densité. En effet, seules les densités faibles (S1, S4 et S7) présentent des résultats équivalents ou à l'avantage des multipoints relais, alors que dans tous les scénarios de moyenne et forte densité CBL réalise une durée noeud-relais presque doublée (métriques Ms7 et Ms13 dans le tableau 2.13).
– Une simple comparaison entre le nombre total de MPR et de noeuds branche ne serait pas équitable, car si tous les noeuds branche sont systématiquement impliqués dans une diffusion, seul un sous-ensemble de MPR est effectivement impliqué en fonction de l'émetteur [129]. Nous avons donc directement comparé le nombre moyen de noeuds relais effectivement impliqués dans une retransmission avec CBL et MPR (métriques Ms9 et Ms15 dans le tableau 2.13). A part dans les scénarios à faible densité où la proportion élevée de noeuds branche attenue l'écart, la structure des MPR implique trois fois plus de relais que celle offerte par CBL dans la retransmission d'un même flux broadcast (Fig. 2.21b).




(a) durée relais (b) durée rattachement noeud à relais

FIGURE 2.22 – Durées d'un noeud en tant que relais (Ms6/Ms12) et de rattachement noeud-relais (Ms7/Ms13) du scenario 3 [2]

Tous ces résultats montrent que le modèle d'organisation imposé par CBL est une alternative sérieuse dans le contexte des VANET. Néanmoins, la structuration réalisée par les MPR a la propriété intéressante d'introduire une certaine redondance de relais pour chaque noeud émetteur [130], ce qui pourrait expliquer sa robustesse. La question de savoir si la restriction à un seul noeud branche par noeud feuille pourrait fragiliser la robustesse de la structure créée par CBL par rapport celle des MPR mérite d'être posée. Je tenterai d'y répondre à travers les prochaines évaluations.

### 2.3.2 Evaluation système de CBL-OLSR

L'analyse structurelle précédente avec MATLAB ne prend en compte ni la technologie de communication radio, ni l'émission des messages TC. L'utilisation du logiciel OPNET Modeler permet de modéliser intégralement un nœud au niveau de ses fonctionnalités de communication.

#### 2.3.2.1 Analyse du trafic de routage sous Riverbed OPNET Modeler

Afin d'évaluer l'impact de la structuration réalisée par les modèles d'organisation portés respectivement par CBL et par la technique des MPR sur le fonctionnement et perfor-

mance du protocole OLSR, nous nous sommes appuyés sur les métriques de routage (Mr) suivantes :

- Mr1 (Charge_routage) : débit en bits/s des messages de routage envoyés sur le réseau ;
- Mr2 (HELLO_total) : débit en bits/s des messages HELLO envoyés sur le réseau ;
- Mr3 (TC_total) : débit en bits/s des messages TC envoyés et retransmis sur le réseau ;
- Mr4 (HELLO/Charge_routage) : pourcentage d'occupation des messages HELLO envoyés par rapport à la charge de routage ;
- Mr5 (TC_total/Charge_routage) : pourcentage d'occupation des messages TC envoyés et retransmis par rapport à la charge de routage ;
- Mr6 (TC_relayé/TC_envoyé) : pourcentage entre les messages TC relayés par rapport aux messages TC envoyés et relayés ;
- Mr7 (Délai WLAN) : délai en ms entre les deux nœuds au niveau de la couche LAN.

TABLEAU 2.14 – Paramètres des protocoles OLSR et CBL-OLSR pour deux ensembles, cas A et cas B, d'intervalles temporels

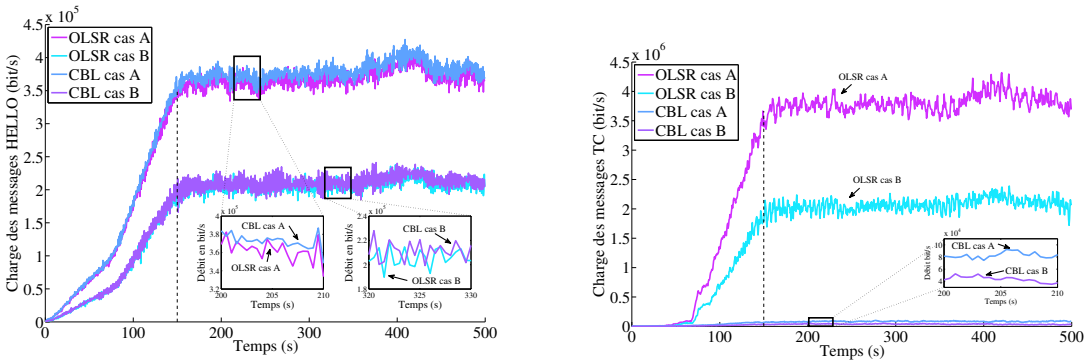
| Attributs | Cas A | Cas B |
|---|---|---|
| Intervalle d'attente entre chaque message Hello (Hello interval) | 1 s | 2 s |
| Intervalle d'attente entre chaque message TC (TC interval) | 2,5 s | 5 s |
| Neighbor hold time : Vtime (3*Hello interval) | 3 s | 6 s |
| Topology hold time (3*TC interval) | 7,5 s | 15 s |
| Duplicate message hold time | 15 s | 30 s |

Afin d'étendre l'observation, nous avons introduit deux cas d'études (Cas A et Cas B) qui se distinguent par les valeurs des paramètres de fonctionnement du protocole OLSR (Tableau 2.14). Les résultats pour tous les scénarios (S1 à S13) présentés en section 2.2.3.1 sont disponibles dans la thèse de Lucas Rivoirard [1]. Je propose ici un aperçu qui résume l'essentiel. Tout d'abord, en prenant le scénario médian S5 (configuration de route R2 et densité médiane), nous observons logiquement que la quantité de trafic liée aux messages HELLO est identique pour CBL-OLSR et MPR-OLSR puisque tous les noeuds (feuille, branche, non-MPR, MPR) génèrent des HELLO de même taille et au même rythme (Fig. 2.23a). En revanche, le nombre très faible de noeuds branche ainsi que de relais par noeud obtenu par CBL réduisent fortement la quantité totale de messages TC générés et TC retransmis (Fig. 2.23b). L'équivalence des trafics liés aux messages HELLO et le fait que le trafic lié aux messages TC soit 10 fois plus élevé que celui des messages HELLO souligne tout l'intérêt que revêt la réduction drastique du trafic lié aux messages TC par CBL.

#### 2.3.2.2 Sensibilité de CBL aux scénarios de mobilité

CBL doit être en mesure de s'adapter à différentes situations de mobilité. Nous avons étudié l'impact des scénarios de mobilité (S10-S13), d'une part, sur les aspects structurels de CBL et, d'autre part, sur le trafic de routage nécessaire au fonctionnement du protocole CBL-OLSR comparativement à OLSR.

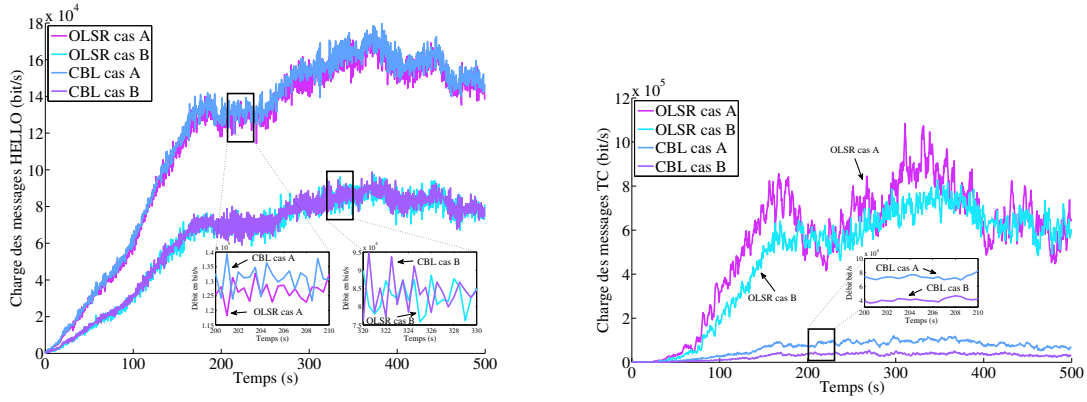
Le pourcentage de nœuds feuille dans le réseau (Ms1) est proche de celui obtenu lors des simulations avec les scénarios S1-S9. Il varie de 49,7% à 71,6% en fonction de la densité de nœuds. Globalement, nous avons observé qu'environ 50 nœuds étaient nécessaires pour construire les quatre chaînes attendues dans le réseau R4 et environ 40 nœuds pour




(a) trafic des messages HELLO (b) trafic des messages TC

FIGURE 2.23 – Comparaison des trafics des messages HELLO et TC dans le scénario S5

le réseau R5. Après ce seuil, tous les autres nœuds sont des nœuds feuille. Ces résultats confirment qu'à partir d'une densité suffisante pour couvrir un segment de route, le nombre de noeuds branche dans CBL ne dépend que de la configuration spatiale de la route et ne croît plus au-délà d'une certaine valeur. Les résultats concernant les métriques de routage des protocoles CBL-OLSR et OLSR pour le scénario de mobilité S10 sont présentés figure 2.24a et 2.24b. L'analyse de ces résultats suit la tendance de celle faite en section 2.3.2.1. Néanmoins, on observe des fluctuations plus nettes sur les trafics des messages HELLO en fonction de l'évolution de la densité de véhicules sur la section d'autoroute. Dans le cas d'OLSR natif (MPR-OLSR), ces fluctuations dues à la mobilité gomment quasiment l'effet de la fréquence de rafraîchissement. En effet, alors que dans le scénario S5 (Fig. 2.23b) le trafic des messages TC de MPR-OLSR double en multipliant par deux le *TC_INTERVAL*, dans le scénario S10 les deux courbes restent sensiblement très proches. D'autres résultats disponibles dans [1] illustrent des écarts similaires. Je pense que cette différence observée selon qu'on utilise des trajectoires synthétiques (S5) ou des traces réelles (S10) mérite d'être examinée de manière plus approfondie. On peut toutefois noter que les courbes relativement linéaires de CBL et qui conservent le même écart (entre cas A et cas B) lorsqu'on change de modèle mobilité, laissent présager que la structure créée par CBL s'adapte plus facilement aux changements de topologie.




(a) trafic des messages HELLO (b) trafic des messages TC

FIGURE 2.24 – Comparaison des trafics des messages HELLO et TC dans le scénario S10

#### 2.3.2.3 Sensibilité aux modèles de propagation

Le modèle d'atténuation en espace libre a jusqu'à présent été utilisé dans les simulations menées pour l'évaluation structurelle du schéma CBL. Afin d'évaluer la sensibilité de CBL-OLSR aux modèles de propagation, nous utilisons cette fois le modèle de propagation OLOS [114] qui a été présenté en section 2.2.3.2. Ce modèle considère qu'en ligne directe, les paquets d'un véhicule voisin peuvent être reçus avec succès sur une distance de 500 m. Par contre, lorsqu'un ou plusieurs voisins se trouvent entre l'émetteur et le récepteur, ce dernier recevra avec succès les paquets jusqu'à une distance de 210 m. Ce modèle a été appliqué dans les simulations de CBL avec trois scénarios de mobilité différents : S1, S2 et S3. Classés de densité faible à forte, ces scénarios permettent de mesurer l'impact du modèle de propagation d'onde dans des situations où les distances intervéhiculaires varient.

Les résultats de simulation des métriques structurelles Ms1 à Ms7 et de routage Mr1 à Mr7, calculées sur l'intervalle de temps de 150 à 500 s et obtenues avec ce modèle de propagation [114], sont reportés dans le tableau 2.15, ainsi qu'une comparaison par rapport à ceux obtenus précédemment avec le modèle de propagation en espace libre sous forme d'augmentation ou de décroissance exprimées en pourcentage. Le tableau 2.15 reporte des résultats structurels similaires pour les scénarios S2 et S3. En effet, l'inter-distance entre les nœuds branche est de l'ordre de 200 m pour ces deux scénarios de mobilité, alors que le modèle de propagation [114] n'a d'impact sur la réception d'un paquet qu'au-delà de 210 m de distance. Pour le scénario S1, seules les métriques Ms1, Ms5, Ms7, Mr2 et Mr3 sont modifiées de manière significative (écart supérieur à 20%). Dans ce scénario les nœuds sont éloignés les uns des autres. Ainsi, si un nœud feuille est présent entre deux nœuds branche, il empêche la communication. Ce nœud feuille sera alors transformé en branche, faisant ainsi augmenter la métriques Ms1. Le modèle de propagation peut donc avoir un impact réel sur les performances de CBL, mais cet impact peut complètement être anticipé selon la topologie (route/densité).

#### 2.3.2.4 Comparaisons avec d'autres protocoles de routage

D'autres résultats sur l'évaluation système de CBL, notamment des comparaisons de performance détaillées avec d'autres protocoles de routage tels que DSR [26], AODV [27], GRP [33], Q-OLSR [56], sont présentés dans [1, 41]. Je ne reviendrai pas sur les détails de ces résultats, mais globalement il a été montré que CBL obtient des performances soit meilleures, soit comparables, mais avec un coût beaucoup plus faible en termes de trafic lié au routage. Le seul axe d'amélioration observé concerne la qualité des liaisons en termes de qualité de service. En effet, même s'il occasionne moins de pertes au niveau WLAN et qu'il obtient le plus faible délai moyen, CBL est surclassé par Q-OLSR sur sa capacité à réduire le trafic IP perdu par défaut de route adaptée pour la prise en charge de certains trafics. Intégrer les mécanismes que j'ai proposés jadis dans Q-OLSR [131] pour la qualité de service dans le processus de sélection de noeuds branche et de construction de chaîne est une tâche prévue dans nos prochains travaux.

### 2.3.3 Performance de CBL pour quelques applications coopératives

Afin de montrer la capacité de la structure résultant de l'organisation imposée par CBL à prendre en charge efficacement du trafic applicatif, nous avons mené plusieurs évaluations en nous appuyant sur les modèles développés. Le premier trafic évalué correspond à celui produit par les véhicules lorsque la taille des messages et leur fréquence d'émission correspondent aux préconisations de l'IEEE et dont les résultats sont détaillés dans [1].

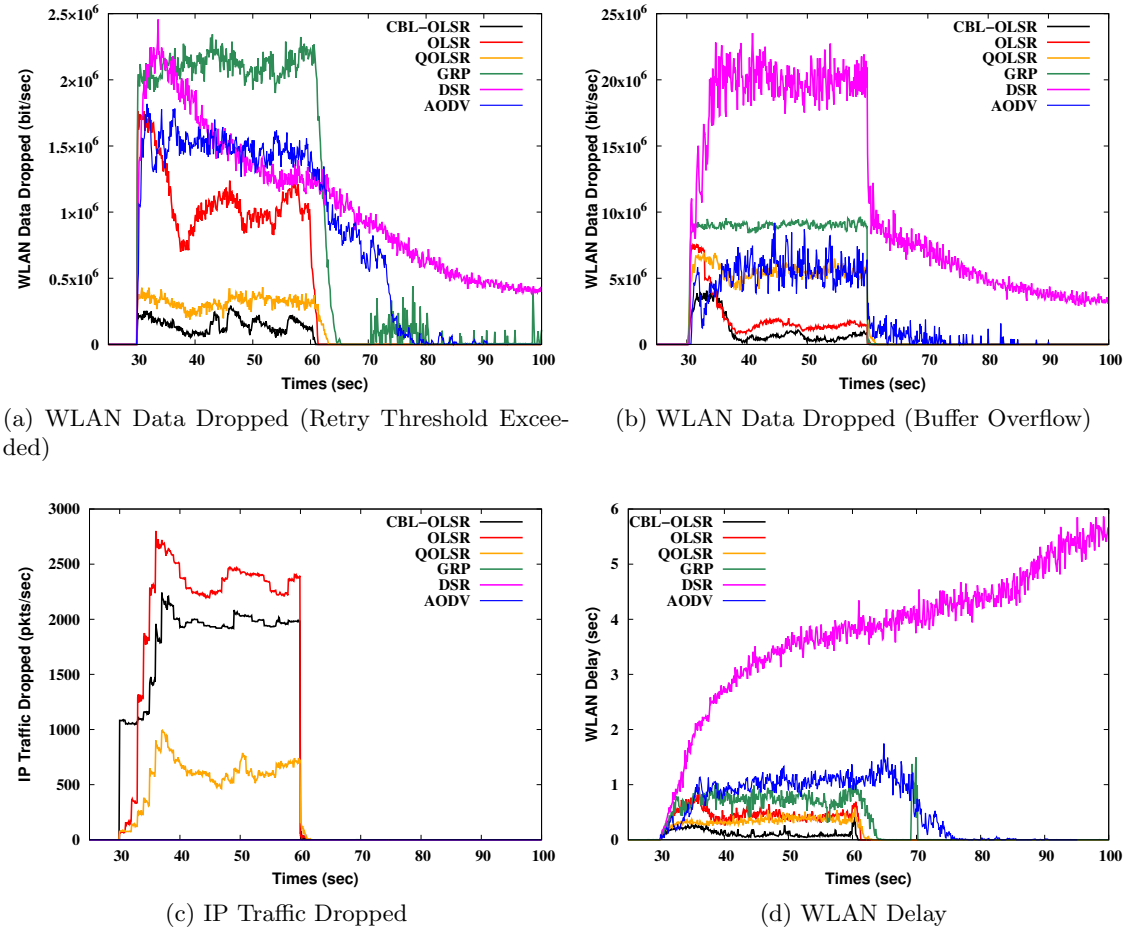
TABLEAU 2.15 – Valeurs moyennes des métriques de performances Ms1 à Ms7 et Mr1 à Mr7 calculées sur l'intervalle de temps de 150 à 500 s – Cas A, scénarios S1 à S3, CBL-OLSR, modèle de propagation OLOS

| | Réseau | | R1 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Scénarios | | 1 | 2 | 3 |
| | Densité | | - | + | ++ |
| | Nombre de nœuds | | 25 | 102 | 198 |
| Structure | Ms1 : Feuille/Réseau (%) | | 44,6 | 83,1 | 90,4 |
| | | *Diff* | *+ 6,4* | *+1,6* | *+0,3* |
| | Ms2 : NB_Chains | | 1,38 | 1,45 | 1,75 |
| | | *Diff* | *-0,3* | *+0,12* | *+0,41* |
| | Ms3 : Branche/Chaîne | | 9,82 | 12,2 | 11,1 |
| | | *Diff* | *+0,42* | *-1,9* | *-3,3* |
| | Ms5 : Feuille/Branche | | 0,793 | 4,98 | 9,62 |
| | | *Diff* | *-1,587* | *-1,19* | *-1,22* |
| | Ms6 : Durée_Branche (s) | | 61,6 | 60,6 | 58,3 |
| | | *Diff* | *+5,3* | *+6,6* | *+3* |
| | Ms7 : Durée_rattachement_Branche (s) | | 34,9 | 36,5 | 35,6 |
| | | *Diff* | *+5,5* | *-2,9* | *-7,3* |
| Routage | Mr1 : Charge_routage (kbit/s) | | 23,9 | 126 | 354 |
| | | *Diff* | *-2,9* | *+0* | *-4* |
| | Mr2 : HELLO_total (kbit/s) | | 10,6 | 93,6 | 309 |
| | | *Diff* | *-0,1* | *+0,4* | *+0* |
| | Mr3 : TC_total (kbit/s) | | 13,2 | 32,5 | 45,1 |
| | | *Diff* | *-2,9* | *-0,7* | *-3,8* |
| | Mr4 : HELLO/Charge_routage (%) | | 49,3 | 75 | 87,3 |
| | | *Diff* | *+5,5* | *+0,3* | *+1,2* |
| | Mr5 : TC_total/Charge_routage (%) | | 50,7 | 25 | 12,7 |
| | | *Diff* | *-5,5* | *-0,3* | *-1,2* |
| | Mr6 : TC_relayé/TC_envoyé (%) | | 86,6 | 90,8 | 89,7 |
| | | *Diff* | *-1,7* | *-0,3* | *-1,3* |
| | Mr7 : Délai WLAN (ms) | | 0,112 | 0,145 | 0195 |
| | | *Diff* | *+0,001* | *+0* | *-0,001* |

Où *Diff* est la différence en pourcentages des "valeurs de CBL avec le modèle de propagation OLOS moins celles de CBL sans le modèle de propagation OLOS".

Nous avons ensuite modélisé une application de localisation distribuée coopérative existante et montré comment l'organisation prônée par CBL pouvait la prendre en charge individuellement et avec quelles performances attendues [65]. En particulier, nous avons montré que le besoin de cette application de s'appuyer sur des échanges locaux entre noeuds faisant partie d'un groupe isolé pouvait être satisfait par le cluster formé par un noeud branche avec les noeuds feuille qui l'ont élu. De plus, la diffusion de l'information de correction de localisation obtenue par cet échange local à l'ensemble du réseau pouvait être assurée par le noeud branche. Le caractère disjoint des clusters obtenus grâce à CBL garantit que les différentes corrections diffusées ne sont pas corrélées.

Le même type d'évaluation a été mené sur une application de perception élargie coopérative [127] considérée également individuellement. Des messages contenant des données de perception de l'environnement, obtenues par chaque noeud feuille à travers les capteurs




(a) WLAN Data Dropped (Retry Threshold Exceeded)

(b) WLAN Data Dropped (Buffer Overflow)

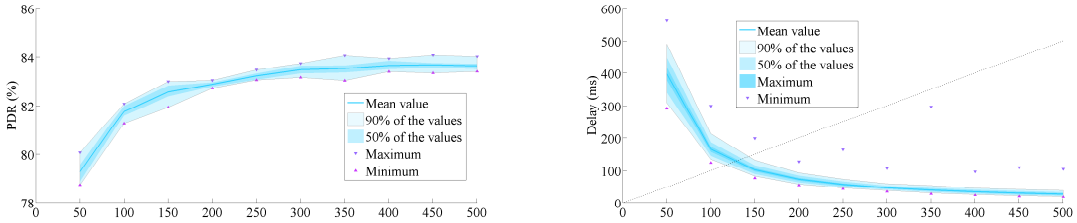
(c) IP Traffic Dropped

(d) WLAN Delay

FIGURE 2.25 – Average of traffic dropped and the WLAN delay (20 sources)

dont il est équipé, sont envoyés au noeud branche. Ce dernier les fusionne avec ses propres données locales pour obtenir une perception au niveau du cluster qu'il diffuse ensuite à travers la chaîne pour une diffusion optimisée dans le VANET. Grâce à ces messages, chaque véhicule peut se construire une perception élargie (amont, aval, complète) jusqu'à autant de sauts que souhaité.

Nous avons enfin entrepris de montrer que plusieurs applications coopératives pouvaient être prises en charge simultanément, en l'occurence les deux applications citées ci-dessus, tout en état confrontées à des trafics concurrents tel qu'un flux de base correspondant aux préconisations IEEE. Les simulations ont été réalisées sur le scénario S10 (avec les trajectoires de traces réelles provenant de l'A27). Parmi les résultats de ces évaluations publiées dans [3], je montre ci-dessous le taux de réception de paquets observé sur l'application de perception collective 2.26a ainsi que le délai observé sur l'application de localisation coopérative 2.26b en fonction de la fréquence d'émission des messages applicatifs. Sur cette dernière figure, on voit clairement que la fréquence d'un message toutes les 125 ms permet d'obtenir un délai de 125 ms, et qu'on peut adapter cette fréquence en fonction du délai souhaité.




(a) Packet Delivery Ratio for collective perception

(b) IP delay for cooperative localization

FIGURE 2.26 – Taux de réception de paquet et délai IP pour deux applications coopératives en présence d'autres trafics [3]

## 2.4 Conclusions et perspectives

### 2.4.1 Conclusions

Dans ce chapitre, j'ai exposé les idées que nous portons sur l'organisation des communications dans les transports terrestres, en particulier sur la route.

La première idée est que toutes les applications développées pour la sécurité routière et l'assistance à la conduite conditionnent à terme les usagers. Par conséquent, celles qui s'appuyent sur des communications doivent pouvoir être maintenues, ne serait-ce qu'en mode dégradé, dans les zones où l'infrastructure est absente, en panne ou surchargée. Notre contribution est un modèle d'auto-organisation, Chain-Branch-Leaf (CBL), qui opère en deux phases. La première phase consiste à une sélection distribuée d'un véhicule, dit noeud branche, pour couvrir chaque portion de la route correspondant approximativement au double de la portée de la technologie de communication. Tous les véhicules présents sur une portion de route déjà couverte par un noeud branche ont le statut de noeuds feuille qui se rattachent à cette branche. L'ensemble ainsi formé constitue un groupe disjoint qui peut ainsi servir aux applications coopératives qui en dépendent. Par exemple, pour affiner la localisation d'un ensemble de véhicules, l'égo-localisation a besoin de minimiser l'erreur sur des groupes disjoints et d'échanger ensuite la correction obtenue par chaque groupe avec les autres. La seconde phase procède à l'interconnection des noeuds branche couvrant chaque portion de route entre eux à travers une dorsale, dite chaîne, afin de permettre des communications dans tout le VANET. Nous avons proposé qu'une chaîne soit formée pour chaque sens de circulation sur une route. CBL se démarque des approches de clustering classiques dans les réseaux ad hoc par sa structure longitudinale spécifiquement adaptée pour la route. Il se distingue des approches opportunistes par le fait justement qu'il crée et maintient une structure. Et enfin, bien qu'il ressemble à d'autres méthodes de clustering à un cluster-head et à un saut, moyennant quelques paramètres de fonctionnement non négligeables, CBL a été conçu pour offrir les quatre services de communication préconisés par Geonetworking de manière simple et sans trafic additionel. A ce jour, deux ans après sa publication, CBL a déjà été référencé dans plus d'une vingtaine de travaux dans la littérature sur le clustering dans les VANET.

La seconde idée portée par nos travaux s'inscrit dans la lignée de la démarche proposée au chapitre 1. La conception et l'évaluation d'un système de communication dédié aux transports doit s'appuyer sur une modélisation la plus réaliste possible des composants et phénomènes qui peuvent impacter les performances. Nous avons donc proposé, en plus de la modélisation du VANET et des protocoles de routage (mécanismes et messages) dans un simulateur pertinent, un ensemble de modèles pour la mobilité (configuration de routes,

trajectoires, vitesses, etc.), les transmissions (propagation, technologie de communication) et les flux applicatifs. Nous avons ainsi pu nous appuyer sur cet ensemble d'outils et de modèles pour proposer une évaluation de la structure créée par l'organisation imposée par CBL dans différentes configurations du VANET, puis sur l'impact du fonctionnement de CBL en termes de trafic de routage, et enfin sur les performances que cette structure permet d'offrir à diverses applications, dont les applications coopératives de perception collective ou d'égo-localisation.

En termes de résultats, la structure créée par CBL comprend, sur chaque segment de route, un nombre de relais (cluster heads ou noeuds branche) limité uniquement par la longueur du segment (environ la longueur du segment divisée par le double de la portée de communication) quelle que soit la densité du trafic routier. Cette dernière n'impacte que la taille des clusters. Par conséquent, CBL montre une forte aptitude à passer à l'échelle avec la densité du VANET. On en observe l'impact dans le trafic de routage, notamment dans OLSR où, la majorité de ce trafic étant alimenté par l'émission et la retransmission de messages de topologie (TC), il se trouve fortement réduit suite au faible nombre de relais, seuls habilités à en générer ou à en retransmettre. La modélisation et la simulation nous ont permis d'obtenir des courbes de performance pour les applications coopératives, déployées individuellement ou simultanément, pour différentes fréquences d'émission de leurs messages. On note des taux de réception de paquets à 85% et des délais autour de 125 ms pour des fréquences d'émission de l'ordre de 10 messages par seconde (fréquence la plus contraignante dans les préconisations de l'IEEE et de l'ETSI).

Une analyse de la sensibilité des résultats obtenus en fonction de la mobilité, des modèles de propagation et des paramètres temporels de fonctionnement de CBL montre qu'ils sont globalement stables pour une grande variété de configurations. Les performances de CBL sont moins spectaculaires dans les scénarios de faible densité qui offrent peu de choix et où à peu près tous les modèles d'organisation aboutissent au même résultat. Néanmoins, à densité moyenne et élevé, nous avons observé que la multiplication de carrefours (voies d'insertion ou de sortie, routes transversales, etc.) impactait davantage la stabilité de la structure. Cette observation présage la nécessité d'une adaptation future de CBL pour un fonctionnement optimal en environnement urbain.

### 2.4.2 Perspectives

Au niveau de la conception, la formation en cluster sur une portion de route proposée par CBL a l'avantage de s'apparenter au canton mobile envisagé en phase 3 d'ETCS dans le ferroviaire où chaque train, géolocalisé et connecté à une infrastructure de communication, pourrait délimiter une zone de sécurité autour de lui et en diffuser l'information continuellement afin que les autres trains en circulation adaptent leur mouvement pour ne pas violer cette zone. Cette similitude préfigure un modèle d'organisation commun à tous les transports terrestres (trains, tramway, voitures) où la différentiation ne portera pas sur le système de communication en soit, mais sur un système global de gestion de trafic qui imposerait des règles particulières selon le type de véhicule et le type de voie. Par exemple, aucun véhicule ne peut intégrer le canton mobile d'un tramway en circulation sur des rails qui coupent la chaussée en ville, mais toutes les voitures qui traversent le canton mobile d'une voiture ayant le statut de noeud branche doivent s'y rattacher en tant que noeud feuille pour les communications V2V, etc. Ce qui pourrait permettre une gestion plus efficace du trafic où certaines décisions pourront être prises localement, directement par le système embarqué dans les véhicules, par un échange via des communications V2V, notamment pour la réactivité ou en cas d'indisponibilité du lien de communication avec

un centre de gestion centralisé. Cela sera davantage crucial avec l'avènement du véhicule autonome sur tous les segments (train, tramway, route). Ces observations ouvrent la voie à la conception d'un système fonctionnel global de gestion de trafic terrestre qui pourrait s'appuyer sur le système de communication global pour la ville (dont l'avènement avec la 5G est inéluctable) afin d'obtenir à l'échelle de tous les transports terrestres un équivalent à l'ERTMS pour le ferroviaire. Si les trains ont vocation à sillonner l'Europe en bénéficiant d'un système de gestion de trafic qui offre une signalisation homogène, on voit mal les voitures connectées ou autonomes reconfigurer toute leur signalisation et perdre l'avantage de tous les services coopératifs et à distance du simple fait du franchissement d'une frontière nationale. Je ne suis pas dupe sur les enjeux que représentent une telle initiative, mais même en gardant à part le fret ferroviraire, les trains à grande vitesse et l'ambition européenne, un tel système pourrait déjà apporter, au niveau national, davantage de sécurité dans la circulation conjointe des trains urbains et régionaux (passages à niveau, gares) avec les tramways, les voitures (pilotés ou autonomes), les motocyclettes, les vélos et les piétons équipés dans un environnement géré par la même signalisation (feux de circulations et panneaux connectés).

En marge de cette perspective à long terme, nous avons entrepris depuis 2019 un objectif à plus court terme qui consiste à étudier et mettre en oeuvre la coordination entre une infrastructure virtuelle structurée grâce à CBL, ou tout autre modèle d'auto-organisation, avec une infrastructure de communication, lorsqu'elle existe, afin d'optimiser la répartition des flux applicatifs entre les deux. Un cas d'usage consiste à définir comment des véhicules auto-organisés grâce à l'infrastructure virtuelle de CBL sur une voie nationale non équipée devront gérer leur arrivée en zone urbaine où une infrastructure réelle est opérationnelle pour prendre en charge leur trafic applicatif, ainsi que la coopération momentanée ou permanente entre les deux infrastructures. Le programme de travail comprend une phase de caractérisation de différents flux applicatifs afin de déterminer les conditions de leur prise en charge par l'une ou l'autre infrastructure. La seconde phase comprend la réalisation et l'évaluation d'un service de communication qui optimise cette répartition en fonction de différents contextes. Ces travaux sont menés en collaboration avec l'Université Gustave Eiffel dans le cadre de la thèse de Sabrine Belmekki qui est encadrée par Martine Wahl et moi-même, comme pour la thèse de Lucas Rivoirard. Les travaux de cette thèse sont prévus jusqu'à l'horizon fin 2022.

Concernant les évaluations, ayant déjà en tête depuis quelques années un système fonctionnel global de gestion de trafic terrestre, j'avais anticipé des évolutions à ce niveau. En effet, comme pour le système fonctionnel de l'ERTMS et la plupart de systèmes sensibles à la sûreté et la sécurité, la conception de ce futur système doit s'appuyer sur des méthodes et des outils rigoureux. Comme je l'ai mentionné en section 1.3.1, dans le domaine des transports guidés, le recours aux méthodes et outils formels dans la modélisation, la conception et l'évaluation est quasiment systématique afin de pouvoir exprimer, vérifier et valider des propriétés attendues du système. Nous avons vu que les communications jouent un rôle de plus en plus crucial dans le fonctionnement de ce type de système. Il est donc logique que les exigences de sûreté et de sécurité soient étendues à la spécification et à l'évaluation de protocoles de communication dédiés aux transports terrestres. Une évaluation essentiellement focalisée sur les performances comme nous l'avons fait dans le cadre de la thèse de Lucas doit être complétée par une démarche dans laquelle il serait également possible d'exprimer et prouver des propriétés en lien avec l'activité de la partie communication. Ainsi, de 2016 à 2019, j'ai encadré la thèse d'Emna Chebbi qui portait sur une approche mixte modélisation formelle et simulation à événemens discrets pour la concep-

tion et l'évaluation de protocoles de communications sûrs et sécurisés dans les transports terrestres. Une présentation succincte des travaux menés est proposé au chapitre suivant.

# 3

# Approche modélisation formelle et simulation à événements discrets

**Sommaire**


**3.1 Introduction . . . . . 87**
**3.2 Description de l'approche modélisation formelle/simulation . . . . . 88**
3.2.1 L'apport des méthodes formelles . . . . . 88
3.2.2 L'approche proposée . . . . . 89
**3.3 Mise en oeuvre de l'approche proposée . . . . . 91**
3.3.1 Modèle DEVS du VANET et du protocole . . . . . 91
3.3.2 Modèle formel du protocole CBL-OLSR dans un VANET . . . . 92
**3.4 Conclusion et perspectives . . . . . 95**
3.4.1 Conclusion . . . . . 95
3.4.2 Perspectives . . . . . 95


## 3.1 Introduction

Les technologies de communications sans-fil constituent un des principaux supports pour le développement de l'Internet du futur (objets, véhicules et villes connectés). La convergence des architectures de réseau vers le tout-IP a favorisé l'émergence de l'Internet des objets et permet un fonctionnement opportuniste des objets connectés qui peuvent communiquer via une infrastructure lorsqu'elle est opérationnelle et basculer en mode ad hoc lorsqu'elle fait défaut. Les réseaux ad hoc, en particulier, apportent une grande flexibilité en offrant la possibilité de communications courte-portée entre tous les nœuds connectés (humains, équipements électroniques embarqués – caméras, micros, capteurs divers, véhicules supports – chars, camions, drones, etc.), y compris dans un contexte dépourvu de toute infrastructure de communication préexistante. La coordination intrinsèquement décentralisée des réseaux ad hoc rend leur sûreté, leur robustesse et leurs performances fortement tributaires des protocoles utilisés pour assurer la découverte des objets faisant partie du réseau, leur auto-organisation, le routage, la qualité de service et la sécurité.

La conception et l'évaluation des protocoles de communication repose généralement sur un modèle fonctionnel construit en fonction des besoins du système. Les études menées par simulation sur les protocoles dédiés aux ITS (Systèmes de transport intelligents) se focalisent souvent sur la mesure des performances obtenues dans le cadre de scénarios de déploiement spécifiques. Nous avons décrit au chapitre 1 une démarche de conception et d'évaluation du système de communication pour l'ERTMS qui a abouti à un laboratoire

virtuel permettant d'évaluer des technologies de communication prises sur étagère dans des scénarios de trafic ferroviaire grâce à la cosimulation. Au chapitre 2, nous avons présenté le protocole CBL-OLSR qui permet de mettre en oeuvre une auto-organisation dans un ensemble de véhicules, y compris en l'absence de toute infrastructure préexistante, et de fournir des services de communication pour les applications usuelles en environnement véhiculaire, notamment les applications coopératives. Dans les deux cas, les évaluations des communications ont été entreprises et analysées essentiellement en termes de performance.

La tendance générale de faire évoluer les transports collectifs et individuels vers les véhicules autonomes met aujourd'hui l'accent sur la nécessité d'avoir des protocoles de communication robustes avec des propriétés garanties, notamment en matière de sûreté et de sécurité. Ainsi, nous avons entrepris quasiment en parallèle de nos précédents travaux, le développement d'une méthodologie de conception et d'évaluation de protocoles de communications qui va dans ce sens. Les méthodes et outils fournis par la modélisation formelle permettent d'obtenir de manière automatique la preuve de certaines propriétés. Néanmoins, pour certaines propriétés complexes, le déchargement des obligations de preuve nécessite l'intervention d'un expert qui fournit des hypothèses, à défaut de connaissances préétablies, dans une boucle interactive. Or, la simulation par sa capacité à tester rapidement de nombreuses possibilités, peut être réalisée dans le but de générer des données qui serviront d'hypothèses dans une boucle interactive en lieu et place de l'expert.

Ce chapitre présente les travaux que nous avons menés dans le cadre de la thèse d'Emna Chebbi (2016-2019) que j'ai encadrée sous la direction d'Eric Ramat. Sans revenir sur les éléments de contexte et les propositions sur lesquelles nous nous sommes appuyés et qui ont déjà été décrits dans ce mémoire, je présente dans un premier temps une vision globale de l'approche développée. Ensuite, je montre à travers quelques exemples les modèles développés et comment ils complètent les contributions présentées précédemment. Enfin, je fais un bilan sur les principaux résultats obtenus et les perspectives ouvertes.

## 3.2 Description de l'approche modélisation formelle/simulation

### 3.2.1 L'apport des méthodes formelles

Les travaux sur la conception et l'évaluation de la performance de protocoles en environnement véhiculaire, y compris pour les communications véhicule-à-véhicule, ont été largement abordées au chapitre 2.

La fiabilité des systèmes critiques peut être améliorée en utilisant des méthodes formelles pour développer leurs sous-systèmes critiques [132]. Des preuves mathématiques permettent de s'assurer que les spécifications répondent aux exigences. L'évolution de la génération automatique du code exécutable directement à partir des spécifications formelles réduit le besoin de recourir aux tests unitaires, car la correction de la construction est garantie par des preuves mathématiques. La formalisation complète d'un système a souvent été soulignée commme une tâche difficile et coûteuse [133]. Diverses méthodes formelles légères [134, 135] ont été proposées pour réaliser des spécifications partielles dans des applications ciblées. On peut citer par exemple les langages formels pour la spécification de la qualité de service, notamment E-LOTO [136]. Les méthodes formelles peuvent être appliquées à différents stades du processus de développement, notamment lors de la spécification, de la vérification et de la génération du code.

Plusieurs travaux récensés notamment dans [137, 138] proposent des modèles formels pour l'analyse des protocoles de routage pour les réseaux ad hoc. Certains ont été menés avec la méthode B [139] qui est souvent utilisée pour raisonner sur des systèmes complexes. Les auteurs de [140] présentent une approche pour vérifier des propriétés de sécurité dans les protocoles de communication embarqués dans les systèmes de véhicules. Une méthodologie pour intégrer la vérification des propriétés de sécurité dans les protocoles de réseau dès la conception est proposée par [141]. Une extension événementielle de la méthode B, Event-B, utilise la notion d'événement pour décrire les actions et non plus des opérations, ce qui la rend très pratique pour la modélisation et l'analyse des protocoles de routage. A titre d'exemples, outre dans [140, 141], Event-B a été utilisé pour la modélisation formelle des protocoles AODV [142], DSR [143] et OLSR [144].

### 3.2.2 L'approche proposée

#### 3.2.2.1 Justification

Deux problèmes persistent néanmoins aux approches formelles et plaident en faveur d'une approche combinée avec la simulation. Le premier concerne l'évaluation conjointe des composants qui s'adaptent à la modélisation formelle avec les autres composants de l'ITS qui ne s'y prêtent pas. Des outils tels qu'Event-B permettent d'évaluer uniquement des modèles formels, alors que les outils de simulation offrent la possibilité de connecter des modèles et des matériels hétérogènes dans un seul processus d'évaluation. Le second est lié au fait que, bien que permettant d'animer un nombre limité d'objets afin de vérifier le comportement d'un système en présence d'interactions, les outils formels n'offrent pas cette possibilité à grande échelle. Une première solution dans cette direction [145] propose d'intégrer les mécanismes de simulation à événements discrets dans un outil de modélisation formelle. Cette approche résout en partie les problèmes liés à l'animation des modèles et au passage à l'échelle, mais pas ceux concernant les interactions avec des modèles non formels.

#### 3.2.2.2 Démarche

La multi-modélisation est un paradigme qui permet de relier des modèles hétérogènes, individuellement basés sur un formalisme différent, en une seule simulation. Les travaux d'Eric Ramat sur la multi-modélisation basée sur le formalisme DEVS (Discrete Event System Specification) [146] ont été appliqués avec succès dans plusieurs analyses basées sur la simulation de systèmes complexes, notamment grâce à l'outil VLE (Virtual Laboratory Environnement) qu'il a contribué à développer [147]. Au lieu d'introduire des mécanismes de simulation DEVS dans un outil formel, comme dans [145], notre idée consiste à intégrer des modèles formels dans un laboratoire virtuel basé sur la multi-modélisation [4]. L'approche proposée est de procéder en trois étapes intervenant dès la conception du protocole :

- modéliser formellement le protocole à partir de sa spécification fonctionnelle, permettant ainsi de vérifier et de prouver ses propriétés (notamment de sûreté et de sécurité) en recourant à des méthodes et outils formels (B/Event-B),
- intégrer le modèle formel du protocole dans une simulation plus large, grâce à la multi-modélisation (en transformant le modèle Event-B en modèle DEVS équivalent), en le couplant aux modèles des autres composants du système, notamment ceux qui ne se prêtent pas à la modélisation formelle,

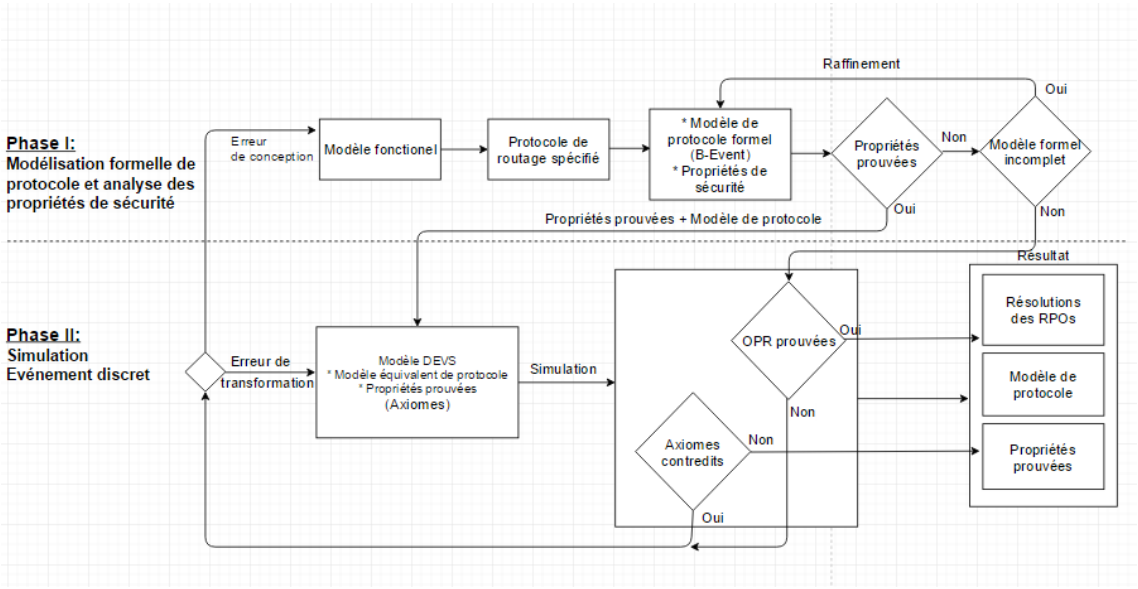



FIGURE 3.1 – Principales phases de l'approche modélisation formelle/simulation DEVS [4]

– intégrer à la simulation DEVS des données réelles et connecter la simulation DEVS avec des simulateurs spécialisés pour les différents composants (par exemple MATLAB pour les modèles de propagation, OPNET ou NS3 pour les communications, SUMO pour les modèles de mobilité). Le but est de plonger virtuellement le système dans un environnement réaliste durant les évaluations, comme nous l'avons fait aux chapitres précédents.

La figure 3.1 décrit les deux phases majeures de l'approche proposée lorsqu'elle est appliquée en utilisant l'outil de modélisation formelle Event-B et l'environnement de multi-modélisation et simulation DEVS (VLE). A partir des spécifications fonctionnelles du protocole, on réalise sa modélisation formelle avec Event-B et on obtient, moyennant tous les raffinements nécessaires, un modèle accompagné d'une série d'obligations de preuves déchargées automatiquement (propriétés prouvées) par le prouveur, ainsi que des obligations de preuves résiduelles (OPR), non déchargées. Il s'agit donc de formaliser ce que deviennent ces trois entités dans un modèle équivalent DEVS. Les propriétés prouvées, sous réserve qu'il n'y ait pas d'erreurs de modélisation ou de transformation, sont normalement des axiomes qui peuvent être considérées comme des contraintes de fonctionnement dans le modèle DEVS. La simulation du modèle équivalent DEVS devrait conduire, à travers ses résultats, à l'accumulation de nouvelles connaissances sur le comportement du système dans diverses configurations qui seront susceptibles d'aider à confirmer ou infirmer les propriétés qui n'ont pas pu être prouvées automatiquement (OPR).

#### 3.2.2.3 Verrou scientifique

Les OPR sont les propriétés dont la preuve aurait pu être réalisée interactivement dans l'outil formel par l'intervention d'un expert. L'idée que nous poursuivons est d'automatiser cette tâche ou tout au moins de pallier les éventuels déficits de connaissance de l'expert grâce à la simulation, voire, pourquoi pas, en y intégrant un système expert. La projection des OPR dans DEVS constitue et démeure le principal verrou scientifique de notre approche. Dans l'hypothèse où elles pourraient être formulées comme des prédicats dont la valeur logique peut être établie par une simple affectation de valeurs aux variables grâce aux résultats d'une simulation, notre démarche permettrait d'ajouter de nouvelles

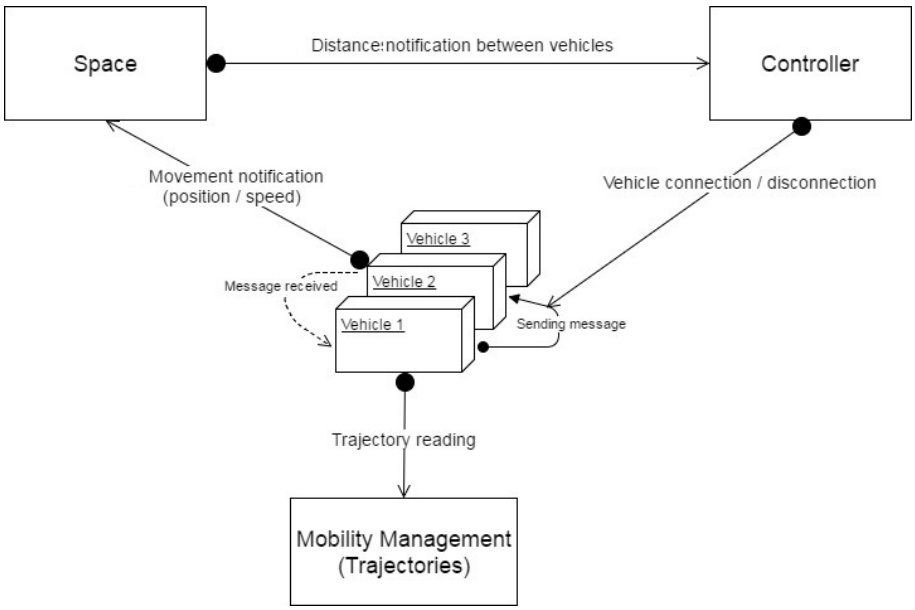



FIGURE 3.2 – Modèle DEVS du VANET dans VLE

propriétés dans la liste de propriétés connues sur le protocole modélisé. Dans les autres cas, plusieurs sujets de recherche restent ouverts.

## 3.3 Mise en oeuvre de l'approche proposée

### 3.3.1 Modèle DEVS du VANET et du protocole

L'étude d'un protocole de routage dans le cadre de notre approche est davantage axée sur ses propriétés plutôt que sur ses performances. Certes, OPNET est également basé sur le formalisme DEVS et intègre des mécanismes permettant la multi-modélisation, mais une partie du code n'est pas accessible sans licence et, comme nous l'avons évoqué au chapitre 2, il existe des limites sur le nombre de noeuds. Par conséquent, la possibilité de modéliser des VANET à très grande échelle ainsi que la maîtrise de l'intégralité du code nous a paru primordial par rapport aux aspects purement technologiques. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons opté pour VLE comme environnement de multi-modélisation.

Ayant logiquement choisi d'appliquer notre approche au protocole CBL-OLSR [69] que nous développions parallèlement dans le cadre de la thèse de Lucas Rivoirard, nous avons d'abord entrepris de vérifier qu'il était possible de modéliser un réseau de véhicules ad hoc (VANET) et le protocole CBL-OLSR. Cette partie de nos travaux est présentée de manière détaillée dans [5].

VLE utilise la modélisation DEVS basée sur des modèles atomiques qui peuvent être couplés. Comme illustré sur la figure 3.2, nous avons introduit trois modèles atomiques ci-dessous :

- *Space* : qui gère le placement des véhicules dans l'espace. Il est possible d'y modéliser finement la propagation, de calculer les distances entre les véhicules et de déterminer l'existence et la qualité des liaisons qui sont notifiées au modèle *Controller* ;
- *Vehicle* : est un modèle atomique qui représente un véhicule. Il est possible d'en instancier autant que nécessaire pour atteindre la densité voulue dans le VANET. Chaque instance de *Vehicle* a accès à la base des trajectoires (Mobility Management n'est pas un réel modèle atomique, mais une simple représentation schématique de

cette base de données) où elle peut récupérer sa trajectoire pour l'intégralité de la simulation. A chaque fois que la simulation exécute les événements liés à un véhicule donné, celui-ci notifie à *Space* ses futures coordonnées dans l'espace. Les algorithmes de CBL-OLSR sont implémentés et exécutés dans le modèle *Vehicle*. Les instances de *Vehicle* peuvent communiquer entre elles en s'envoyant des messages, pourvu qu'il existe une liaison entre elles, ce qui permet d'implémenter les messages HELLO et TC ;

– *Controller* : est un super-modèle atomique qui peut agir sur les objets du modèle couplé. Il est capable de créer des instances des autres modèles. Ainsi, c'est lui qui crée une instance de *Vehicle* à chaque fois qu'un nouveau véhicule intègre la simulation. C'est lui aussi qui crée ou supprime les liaisons entre les instances de *Vehicle* en fonction des informations fournies par *Space*.

Chaque modèle atomique permet de définir des variables qui collectent des statistiques diverses tout au long de la simulation en fonction de ce qui s'y déroule. Le modèle a été validé par comparaison en le simulant sur les mêmes scénarios que ceux présentés au chapitre 2. Les résultats présentés en 2018 à la conférence Ambiant Systems, Networks and Technologies [5] correspondent à un VANET basé sur le scénario S10 où les véhicules se déplacent suivant des traces réelles provenant de l'autoroute A27. La figure 3.3 montre l'évolution du nombre de véhicules sur le tronçon de route simulé, ainsi que la répartition entre noeuds branche et noeuds feuille, et indirectement le nombre de chaînes à travers la métrique *branch_nodes_in_each_chain*.

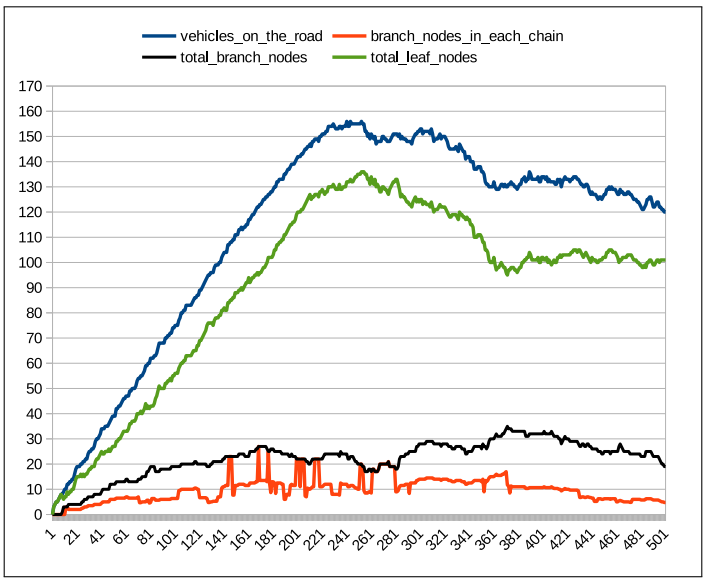



FIGURE 3.3 – Evolution du nombre des noeuds branche et feuille dans la simulation [5]

### 3.3.2 Modèle formel du protocole CBL-OLSR dans un VANET

Du fait de l'utilisation du protocole OLSR pour implémenter CBL, nous nous sommes inspirés du modèle formel d'OLSR proposé par [144] avec Event-B. La présentation détaillée du modèle a été faite en 2019 au symposium Frontiers in Ambient and Mobile Systems [6]. Le modèle de base d'un protocole de routage proposé par [144] est implémenté dans le contexte *C0* et la machine *M0*. Il définit les ensembles *NODES* de noeuds (véhicules) et *MSG* de messages, ainsi que les fonctionnalités de base telles que l'émission, la réception et la perte de messages. Nous l'avons complété grâce au contexte *C1* et

la machine *M1* qui implémentent l'ensemble de variables et d'événements nécessaires au fonctionnement de CBL-OLSR. Les principaux éléments de la modélisation peuvent être résumés comme suit :

– Nous introduisons un ensemble *Traffic* qui permet de représenter un sens de circulation sur une route et une fonction *position* qui permet d'associer chaque noeud à une coordonnée dans *Traffic*. Cela permet aux fonctions *upstream* et *downstream* d'indiquer entre deux noeuds lequel est en amont/aval de l'autre. Toute cette partie de la modélisation sera mise en relation avec le modèle *Space* dans VLE ;

– Aux fonctions d'envoi et réception de messages HELLO et TC déjà modélisées par [144], nous avons ajouté des variables et événements permettant de modéliser les choix de noeud branche et la formation de la chaîne. A travers les invariants des machines et les *guard* dans les événements, nous avons introduit toutes les règles qui permettent le fonctionnement du protocole de manière à vérifier les propriétés qui en sont attendues.

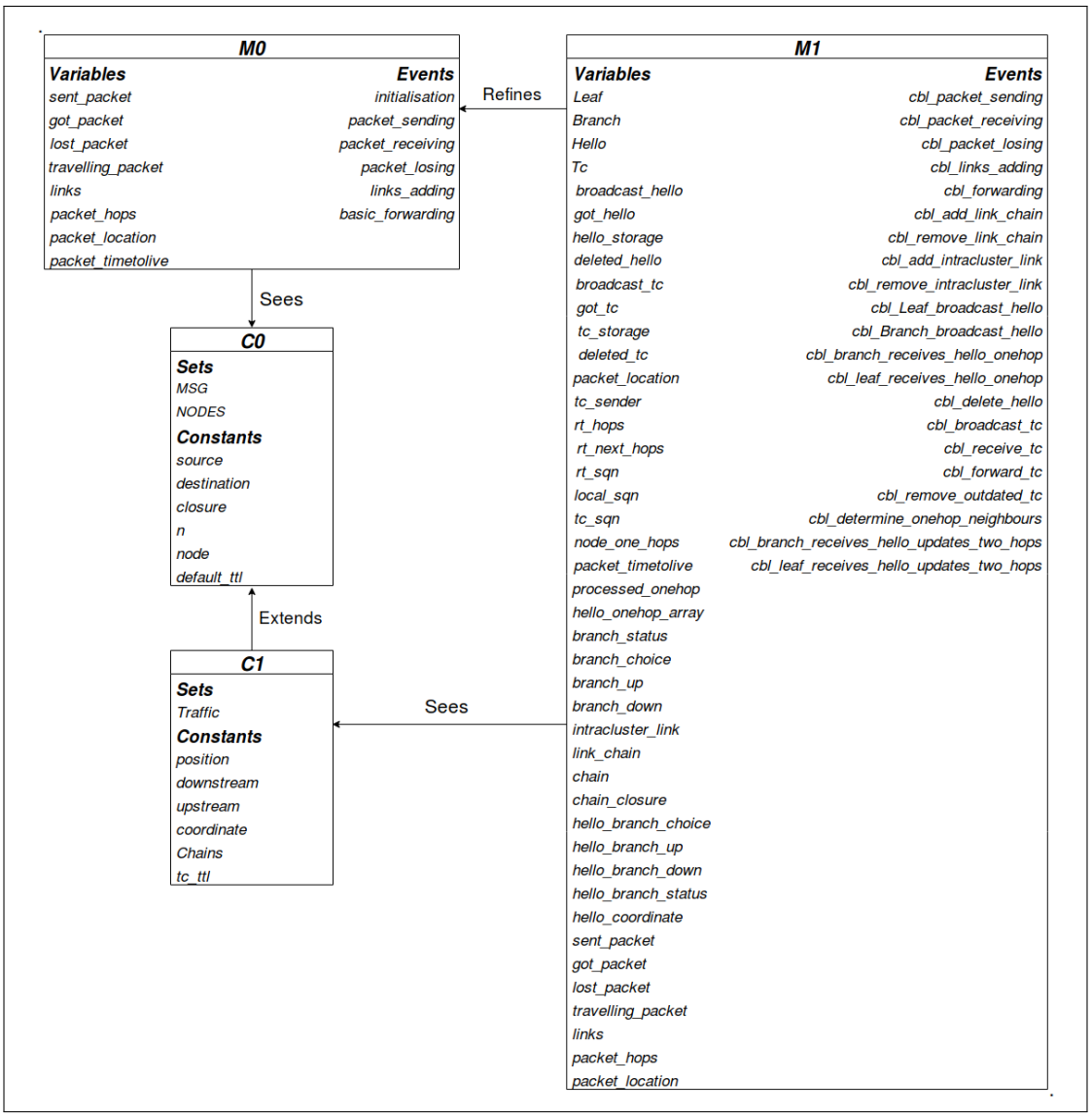



FIGURE 3.4 – Overview of the CBL-OLSR formal model in Event-B : contexts and machines [6]

Par exemple, les invariants *inv42* et *inv43* forcent à vérifier qu'un noeud feuille qui a des voisins doit impérativement en avoir désigné un comme noeud branche. De même,

l'invariant *inv50* impose que tout noeud branche qui a des voisins à portée de communication derrière lui, en désigne un comme noeud branche en amont. Dans l'événement *cbl_broadcast_tc*, la précondition *grd1* vérifie que le noeud émetteur a bien le statut de noeud branche.

Les résultats préliminaires se présentent sous la forme (tableau 3.1) de nombre d'obligations de preuves par contexte et par machine, ainsi que leur répartition entre celles déchargées automatiquement ou non. Dans cette première modélisation, toutes les propriétés que nous avons spécifiées sont déchargées automatiquement.

**INVARIANTS**

inv1 : Leaf ⊆ NODES

inv2 : Branch ⊆ NODES

inv3 : Branch ∩ Leaf = ∅

inv4 : Branch ∪ Leaf = NODES

...

inv34 : branch_status ∈ NODES → BOOL

inv35 : node_one_hops ∈ NODES → (NODES → BOOL)

...

inv41 : branch_choice ∈ Leaf → NODES

inv42 : ∀ s · s ∈ Leaf ∧ ( ∃ x · x ∈ NODES ∧ node_one_hops(s)(x) = TRUE) ⇒ branch_choice(s) ≠
node

inv43 : ∀ s · s ∈ Leaf ∧ ( ∃ x · x ∈ NODES ∧ node_one_hops(s)(x) = TRUE) ⇔ ( ∃ y · y ∈ NODES ∧
node_one_hops(s)(y) = TRUE ∧ branch_choice(s) = y)

...

inv50 : ∀ s · s ∈ Branch ∧ ( ∃ x · x ∈ NODES ∧ node_one_hops(s)(x) = TRUE
∧ upstream(coordinate(x))(coordinate(s)) = TRUE) ⇔ ( ∃ y · y ∈ NODES ∧ node_one_hops(s)(y) =
TRUE ∧ upstream(coordinate(y))(coordinate(s)) = TRUE ∧ branch_up(s) = y)

...

**cbl_broadcast_tc**

**ANY**

s, tc

WHERE

grd1 : s ∈ Branch

grd2 : tc ∈ Tc

grd3 : tc ∉ broadcast_tc

grd4 : source(tc) = s

grd5 : s ↦ tc ∉ tc_storage

**THEN**

act1 : tc_sender := tc_sender {tc ↦ s}

act2 : tc_storage := tc_storage ∪ {s ↦ tc}

act3 : broadcast_tc := broadcast_tc ∪ {tc}

act4 : local_sqn := local_sqn {s ↦ local_sqn(s) + 1}

**END**

TABLEAU 3.1 – Proof Statistics.

| Model | Number of Proof Obligations | Automatically Discharged | Interactively Discharged |
|---|---|---|---|
| C0 | 4 | 4 | 0 |
| M0 | 60 | 60 | 0 |
| C1 | 2 | 2 | 0 |
| M1 | 306 | 306 | 0 |
| Total | 372 | 372 | 0 |

## 3.4 Conclusion et perspectives

### 3.4.1 Conclusion

Les travaux menés dans le cadre de la thèse ont abouti en premier lieu à une première modélisation DEVS d'un VANET et du protocole de routage qui en assure l'auto-organisation. Appliquée au protocole CBL-OLSR dans le cadre du scénario S10, construit à partir de traces réelles de véhicules circulant sur une section d'autoroute, cette modélisation a pu être validée par comparaison avec les résultats des travaux décrits au chapitre 2. Ils ont également permis de mettre en oeuvre une modélisation formelle avec Event-B du protocole CBL-OLSR dans un VANET en y intégrant des mécanismes permettant de prendre en compte les mouvements des véhicules.

Une première tentative a été menée pour modéliser des propriétés liées à la sécurité dans le modèle formel. Elle a été obtenue en intégrant la modélisation Event-B proposée dans [148] pour la transmission de messages chiffrés dans le cadre de transactions. Les résultats obtenus ne nous ont pas permis d'obtenir des propriétés suffisamment complexes pour aboutir à un nombre significatif d'OPR. Bien que cette modélisation ait été une expérience intéressante dans le cadre de la thèse, l'obtention d'OPR est essentielle pour le développement de notre approche dont le principal verrou scientifique est lié à cette question. Il semble donc impératif de développer des mécanismes de sécurité avancés pour le protocole CBL-OLSR afin de pouvoir décrire des propriétés complexes à intégrer à la modélisation proposée.

La procédure de transformation vers DEVS amorcée durant la thèse porte donc essentiellement sur le modèle formel du protocole et les propriétés prouvées, à défaut d'OPR. Là également, sur le temps imparti pour la thèse, elle s'est limitée à une génération automatique de code intégrable dans DEVS, avec des indications de règles à appliquer pour construire les modèles atomiques DEVS. Certes, cela représente un début intéressant permettant de construire a posteriori une méthodologie formelle pour opérer les transformations, mais c'est justement cette dernière tâche qui revêt un intérêt et à laquelle il va falloir s'atteler.

### 3.4.2 Perspectives

Une partie des perspectives a été implicitement exprimée à travers les conclusions que j'ai présentées sur nos travaux.

Dans le cadre de la fiche projet SECOURT du CPER ELSAT, je participe à des travaux sur les communications et la cybersécurité dans les transports, en particulier les réseaux de véhicules. J'ai pu recruter un postdoctorant qui contribue à la poursuite de nos travaux sur la modélisation formelle et la transformation des modèles Event-B vers DEVS. Ces travaux

ont vocation à se poursuivre jusqu'à l'horizon 2022, même si le contrat du postdoctorant se termine en 2020.

Je suis particulièrement intéressé par l'expression de propriétés qui entraîneraient dans la modélisation formelle des obligations de preuves de complexité variée nécessitant une preuve interactive. La recherche sur la méthodologie, les concepts et les structures de données appropriés pour représenter ces OPR dans DEVS, voire peut-être dans un couplage entre Event-B et DEVS, va constituer une partie de mes activités futures. J'encadre actuellement la thèse de Valentin Mullet dans le cadre du projet ETAPLES 4.0, financé par l'AAP Industrie du futur de la région Hauts-de-France, que j'ai initié avec VALEO (pour la période 2019-2022) et qui prévoit d'explorer des solutions basées sur la blockchain pour la traçabilité en milieu industriel. Les résultats envisagés pourraient être appliqués à la sécurité des protocoles de communications des réseaux ad hoc de véhicules et, peut-être, nous fournir les propriétés complexes dont nous avons besoin.

# Deuxième partie

# Mémoires de parcours

# A

# Parcours

## A.1 Informations personnelles

Dr. Patrick Sondi Obwang

| | |
|---|---|
| Date de naissance | 31 mars 1979 (41 ans) |
| Unité de Recherche | Laboratoire d'Informatique, Signal et Image de la Côte d'Opale - LISIC<br>*Université du Littoral Côte d'Opale* |
| Unité d'Enseignement | Département Informatique<br>*Université du Littoral Côte d'Opale* |
| Adresse | 50, rue Ferdinand Buisson BP 719<br>62228 Calais Cedex France |
| Page web | https://www-lisic.univ-littoral.fr/∼*sondi* |

## A.2 Parcours professionnel

| Début | Fin | Etablissement | Fonctions |
|---|---|---|---|
| 09/2013 | ... | Université du Littoral Côte d'Opale - LISIC EA 4491 | Maître de conférences |
| 10/2012 | 09/2013 | IFSTTAR - COSYS/LEOST | Chercheur contractuel |
| | | Université de Valenciennes - IUT Maubeuge | Enseignant Vacataire |
| 06/2011 | 09/2012 | IFSTTAR - COSYS/LEOST | Postdoctorant |
| | | Université de Valenciennes - ISTV | Enseignant Vacataire |
| 09/2010 | 06/2011 | Université de Valenciennes - LAMIH/ISTV | ATER temps plein |
| 09/2007 | 09/2010 | Université de Valenciennes - LAMIH/ISTV | Allocataire-Moniteur |
| 03/2007 | 09/2013 | Université de Valenciennes - LAMIH | Stage de DEA |
| | | Supinfo Paris Valenciennes | Enseignant Vacataire |
| 04/2006 | 10/2006 | Siemens Transportation Systems (Lille) | Stage Maîtrise + CDD |
| 09/2004 | 04/2006 | Université de Valenciennes - Bibliothèque | Tuteur informatique |

**Distinction** : PEDR (2019-2023) sur classement par le CNU 27 pour les travaux menés de 2015 à 2018.

**Mobilité internationale** :

Séjour de recherche au Tampere Institute of Technology (Finlande) en février 2013.
Financement par le COST WiNeMo (Fonds Européens).

## A.3 Formation universitaire

2007 - 2010 : **Doctorat** au LAMIH (UMR CNRS 8201), Bourse MESR
Soutenu le 10/12/2010 à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
Titre : Le routage à qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc.
Mention Très honorable.
Mémoire : https ://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00551243v2
Directeurs : Sylvain Lecomte, PR 27 (UVHC) et Dhavy Gantsou, MCF (UVHC)
Rapporteurs : Pascale Minet, DR (INRIA) et Amir Qayyum, PR (Univ. M.A. Jinnah)
Jury : Eric Gressier-Soudan, PR (CNAM), Anis Laouiti, MCF (Telecom SudParis)
et Sidi-Mohamed Senouci, PR (Université de Bourgogne).

2006 - 2007 : **DEA/Master Recherche** en Informatique, Major de promotion
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

2005 - 2006 : **Maîtrise/Ingénieur-Maître** en Informatique
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

2004 - 2005 : **Licence** en Informatique
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

2002 - 2004 : **DEUG** en Informatique
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

1998 - 2002 : **Certificat d'études prépolytechniques**
Faculté Polytechnique de Kinshasa, R. D. Congo

## A.4 Formations pédagogiques

| | |
|---|---|
| Formation suivie au Centre d'Innovation Pédagogique Université du Littoral Côte d'Opale (2018) | - Apprentissage par problème/projet |
| Formations suivies au Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur (2007-2010) | - Formation de base des moniteurs à la fonction d'enseignant<br>- Evaluer les apprentissages et les acquisitions<br>- Histoire et épistémologie des sciences<br>- Gestion du temps<br>- Se mettre en scène (techniques théâtrales pour l'enseignement)<br>- Valoriser son expérience d'enseignement lors d'une candidature<br>- Animer un groupe de formation |

## A.5 Activités scientifiques

Ma thématique de recherche principale porte sur l'**ingénierie des protocoles de communication**. Je propose des **méthodologies** et développe des **outils** destinés à **améliorer la conception et l'évaluation de ces protocoles** par une **modélisation** fine et exhaustive au

possible des systèmes ciblés afin de faciliter leur adoption et leur utilisation effective dans les secteurs visés, en l'occurence les **systèmes de transport et de logistique intelligents**. C'est la raison pour laquelle mes travaux de recherche sont toujours menés en parallèle avec le développement de **plateformes expérimentales** et, a minima, de nombreuses évaluations par **simulation** à partir de données réelles de l'activité. Cette thématique s'est construite et s'est imposée dans le temps à la fois par les opportunités, mais aussi par un travail personnel constant de mise en perspective de mes implications dans des projets de recherche avec mes compétences acquises.

Initialement focalisés sur un maintien efficace de la connectivité et sur la performance, mes travaux sur les protocoles de communication ont longtemps porté essentiellement sur **l'auto-organisation et la qualité de service**. Depuis quelques années, du fait de l'application de mes travaux aux **communications dans les transports**, je m'intéresse également et davantage aux propriétés qui peuvent être garanties, notamment en matière de **sûreté et de sécurité**. Cette évolution a orienté mes travaux vers le **couplage entre modélisation formelle et simulation à événements discrets** pour élaborer des **méthodologies et des outils de conception et d'évaluation de protocoles de communications** susceptibles de rendre compte à la fois de **la performance et de propriétés prouvées**.

### A.5.1 De la thèse au LISIC (2010-2013)

J'ai mené mes travaux de thèse sur le routage à qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc. Au moment de ma soutenance fin 2010, je suis ATER depuis trois mois et mon activité de recherche consiste essentiellement au traitement de résultats et à la synthèse des contributions de ma thèse. Un premier travail décrit les apports théoriques de ma thèse sur la modélisation et la résolution des problèmes posés par l'optimisation de la diffusion et le routage à qualité de service [131]. Un second travail décrit une implémentation du protocole OLSR intégrant mes contributions, ainsi que toutes les évaluations réalisées avec le simulateur OPNET [56]. Le LAMIH étant un laboratoire très actif dans les transports, j'ai entrepris l'adaptation des contributions de ma thèse à la forte mobilité pour viser les applications en environnement véhiculaire. J'ai encadré à cette occasion le stage recherche de Master d'Hanene Gabteni, en collaboration avec mon encadrant de thèse Dhavy Gantsou. L'étudiante a poursuivi en thèse à l'Université de Haute Alsace.

Suite à un concours, j'ai obtenu en 2011 une bourse postdoctorale à l'Université Gustave Eiffel (ex IFSTTAR). J'avais l'opportunité de proposer un sujet libre, mais j'ai choisi d'adhérer à un projet du laboratoire d'accueil (LEOST) visant l'évaluation des technologies de télécommunications pour les systèmes ferroviaires du futur. Mes travaux, décrits au chapitre 1 de la première partie de ce manuscrit, ont débuté en particulier sur le GSM-R qui est utilisé dans le système européen de gestion de trafic ferroviaire (ERTMS). J'ai contribué au développement d'une approche basée sur la co-simulation pour intégrer des outils existants dédiés à la simulation de la partie signalisation-contrôle des trains dans l'ERTMS et un outil dédié à la simulation des technologies de télécommunication pour la partie GSM-R [19]. Le but est de pouvoir rejouer en offline ou dérouler en live des scénarios entre les deux simulateurs pour observer le comportement de l'ensemble du système dans le contexte d'un même scénario, et pouvoir mener des évaluations poussées sur les technologies de télécommunication candidates pour équiper les systèmes ferroviaires du futur en les confrontant à un contexte fonctionnel réaliste.

Ces travaux ont été poursuivis dans le cadre du projet ANR VEGAS (labellisé par le pôle de compétitivité i-Trans), coordonné par Marion Berbineau et dont nous avons obtenu

le financement durant mon séjour postdoctoral. Nous y avons utilisé le simulateur ERTMS d'ERSA France pour la partie fonctionnelle (contrôle-commande) et OPNET pour la partie télécommunication. L'architecture de la plate-forme comprend un logiciel intermédiaire que nous avons conçu, identifié en tant que Cosimulation Manager, qui récupère en temps réel les données sur les mouvements des trains et les messages qu'ils échangent avec l'infrastructure dans le simulateur ERTMS via des interfaces CORBA. Le simulateur ERTMS étant un simulateur à événements discrets mais évoluant dans un temps continu, il n'est pas possible de lui imposer des mécanismes de pause/reprise pour l'intégrer à une synchronisation plus large. En conséquence, il faut gérer au niveau du Cosimulation Manager le déroulement offline ou online d'une cosimulation avec OPNET. Cette tâche est facilitée par le fait qu'OPNET supporte le formalisme de simulation à événements discrets (DEVS) avec un temps discret et qu'il fournit des interfaces qui permettent à la fois de programmer et de contrôler l'exécution d'une simulation à partir d'un code externe. Nous avons donc pu formaliser un protocole de cosimulation qui permet de récupérer en temps réel les données d'une simulation (voies, scénario, mouvements des trains, messages échangés) qui se déroule dans le simulateur ERTMS via les interfaces CORBA et de tout rejouer en live (avec un feedback d'OPNET vers le simulateur ERTMS) ou a posteriori (sans feedback) dans OPNET afin d'observer le comportement d'une technologie de télécommunication particulière. Les scénarios peuvent également être générés à partir de traces réelles [21] fournies par des opérateurs du ferroviaire. L'initiative de Réseau Ferré de France d'ouvrir ses données pour la recherche constitue un signal positif pour le développement de ce type de scénarios. Durant cette période, j'ai encadré deux stagiaires dans leur dernière année de Master.

### A.5.2 Activités scientifiques au LISIC (2013 à ce jour)

#### A.5.2.1 Conception et évaluation de protocoles de communication pour les transports

Lorsque je suis recruté au LISIC (ULCO) en 2013, je mène de front deux activités de recherche. D'une part, je poursuis mes travaux de thèse en orientant leur application vers les réseaux ad hoc de véhicules (VANET). D'autre part, je me suis intéressé aux travaux déjà engagés dans mon laboratoire d'accueil à l'IFSTTAR, le LEOST, sous la supervision de Marion Berbineau et portant sur les systèmes de télécommunication pour le train du futur. Convaincu depuis quelques années auparavant que les systèmes de communication pour les transports évolueraient dans un futur proche vers l'intégration de composantes basées sur des communications ad hoc dans des ensembles gérés par une infrastructure de télécommunication plus large, j'y ai vu une opportunité de me familiariser avec les systèmes de télécommunication basés sur des infrastructures (GSM, GPRS, UMTS, LTE) pour compléter mes compétences acquises sur les réseaux. Mes travaux menés dans ce contexte vont avoir deux conséquences sur mon activité de recherche au LISIC :

– la première concerne la poursuite de mes travaux sur les réseaux mobiles ad hoc qui vont aboutir à la proposition d'un sujet de thèse avec Martine Wahl (Chargée de recherche à l'IFSTTAR) en 2015. Ce sujet a été sélectionné par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire pour être présenté aux ITPE et l'un d'entre eux a choisi notre sujet. Après quelques travaux préliminaires [60, 149], la thèse de Lucas Rivoirard, résumé au chapitre 2 de la première partie de ce manuscrit, constitue une proposition originale d'un modèle d'auto-organisation pour l'optimisation de la diffusion et le routage dans un environnement véhiculaire en se basant uniquement sur des communications véhicule-à-véhicule. La méthode de clustering proposée, Chain-Branch-Leaf (CBL) [24], a été évaluée en comparaison avec des pro-

tocoles bien établis, ainsi que pour des applications essentielles pour les véhicules telles que la perception élargie et la localisation coopérative. Nous avons également engagé avec la SATT Nord la valorisation d'un service de communication utilisant les mécanismes réalisés au cours de cette thèse . Un dépôt a été effectué à l'APP et une convention de collaboration entre l'IFSTTAR et l'ULCO a été signée par les Responsables des deux Institutions, avant de procéder au dépôt d'une déclaration d'invention à la SATT Nord.

– la seconde concerne le développement d'une approche basée sur la cosimulation permettant de connecter en temps réel un simulateur de trafic ferroviaire (simulateur ERTMS) avec un simulateur de technologies de télécommunication (OPNET) afin de mener des évaluations conjointes du sous-système de contrôle-commande des trains (ETCS) et du sous-système de télécommunication (GSM-R ou le futur LTE-R) dans le cadre du système européen de gestion de trafic ferroviaire (ERTMS). Ces travaux ont abouti à plusieurs publications durant mon postdoc ainsi qu'au dépôt d'un projet ANR que j'ai en grande partie contribué à rédiger. Ce projet a été approuvé dans le cadre de l'appel Transport Durable et Mobilité en 2012 sous le sigle VEGAS (http ://vegas.ifsttar.fr) pour la période 2012-2016. A mon recrutement à l'ULCO, j'ai intégré le LISIC et l'ULCO en tant que partenaire officiel du projet ANR avec moi-même comme porteur et Eric Ramat (PR ULCO) comme membre participant. Ce projet a débouché à un logiciel et à plusieurs publications dont une une synthèse a été faite en fin de projet sous la forme d'un chapitre d'ouvrage [7] dans un livre entièrement consacré aux systèmes de télécommunication sans-fil du futur pour les trains à grande vitesse. Ces travaux sont également détaillés au chapitre 1 de la première partie de ce manuscrit.

Une synthèse entre ces deux approches est abordée dans le sujet de thèse de Sabrine Belmekki que je co-encadre avec Martine Wahl depuis octobre 2019. Anticipant sur la mutualisation future des infrastructures de télécommunication pour la ville intelligente, nous étendons nos travaux antérieurs pour aboutir à une proposition globale intégrant des composantes organisées selon des communications véhicule-à-véhicule (V2V) avec une infrastructure de télécommunication lorsqu'elle existe. Les travaux se déroulent dans le cadre de la convention établie entre l'ULCO et l'Université Gustave Eiffel. L'encadrement de cette thèse va représenter un bon tiers de mon activité jusque septembre 2022.

#### A.5.2.2 Conception et évaluation de systèmes d'objets connectés pour la logistique

Mon recrutement au LISIC a été fortement motivé par cette possibilité que j'apportais au laboratoire de s'impliquer à nouveau dans des projets de recherche et des projets industriels en lien avec les transports. Mais en même temps, un rapprochement entre mes travaux et les thématiques transversales de l'ULCO centrées autour de la mer s'imposait. A partir de mon recrutement en 2013, j'ai entrepris de monter des partenariats, notamment avec l'ICAM (Institut Catholique des Arts et Métiers) Lille ainsi que des Entreprises de la région autour du déploiement de capteurs connectés par un réseau ad hoc pour la traçabilité continue en logistique. Deux sujets de thèses cofinancés par ces partenaires n'ont pas pu aboutir en 2014 et 2015, faute de cofinancement public. Cette activité a néanmoins permis une publication [150] et l'obtention d'un financement interne de l'ordre de 15k€ au titre de Bonus Qualité Recherche (BQR) en 2015 afin de monter une plateforme expérimentale basée sur des objets connectés via un réseau ad hoc pour la traçabilité continue, notamment en usine de production ou en logistique portuaire. Cet investissement a pu être valorisé en partie en fonds propres pour soutenir la participation du LISIC au projet

CPER ELSAT2020 porté par l'UPHF et l'Université Gustave Eiffel. L'ULCO y participe désormais depuis 2015 dans la fiche projet SECOURT dont je suis membre et porteur identifié pour le LISIC. L'enveloppe globale allouée à l'ULCO est de 10k€ en équipement et 45k€ en personnel qui ont servi à recruter un postdoc au LISIC sur 12 mois (2019-2020).

Dans le cadre de ces activités, j'ai également encadré en 2016 un projet de recherche de Master 1 de Valentin Mullet, étudiant en Master Informatique alors en apprentissage dans le site de VALEO EEM à Etaples. Ses activités en entreprise étant centrées sur la mise en place d'un système global de traçabilité depuis les terminaux de collecte jusqu'à la sauvegarde de données collectées et leur exploitation, nous avons mis en évidence plusieurs verrous intéressants pour des recherches en lien avec l'industrie 4.0. Nous avons donc monté un projet en réponse à l'AAP Industrie du futur de la région Hauts de France pour s'y atteler et pouvoir appliquer les résultats à l'usine de VALEO à Etaples. Le projet a été approuvé pour un financement et a pu démarrer le 1/12/2019. Le financement alloué à l'ULCO inclut 50% de financement de contrat doctoral par le FEDER qui a été complété par 30% de financement VALEO et 20% de financement ULCO. VALEO a également consenti un financement supplémentaire forfaitaire pour permettre à l'étudiant de percevoir un revenu complémentaire au titre de Doctorant Conseil. L'activité de recherche est consacrée à la conception d'une solution de type blockchain pour renforcer la sécurité (intégrité et non-répudiation) du système de traçabilité à l'interface entre VALEO et ses partenaires (fournisseurs, clients, etc). Très précisément, nous nous intéressons à la définition et à la mise en œuvre de périmètres de confidentialité dans une blockchain afin que les exigences de transparence pour les partenaires impliqués ne se fasse pas au détriment de la confidentialité souhaitée par certains d'entre eux sur certaines parties du système. Une réponse adéquate aux questions soulevées est un impératif pour faciliter l'adoption de cette technologie dans les sites de production sensibles à la protection de la propriété intellectuelle et à la préservation du secret industriel. Les résultats de ces recherches ont un double intérêt dans la mesure où ils pourraient être également appliqués à la sécurité des communications en environnement véhiculaire. En particulier, il s'agit de mettre en place des mécanismes de non-répudiation pour les communications véhicule-à-véhicule qui ne passent pas par un opérateur, généralement mandataire public pour remplir cette fonction. Ces travaux que menerait personnellement en marge de la thèse ainsi que l'encadrement de la thèse elle-même occuperont un bon tiers de mon temps jusque novembre 2022.

#### A.5.2.3 Approche méthodes formelles/DEVS pour l'évaluation de systèmes complexes

J'ai enfin obtenu en 2016 une bourse régionale finançant 50% d'une thèse en contrat doctoral avec une participation complémentaire de 50% de l'ULCO pour un sujet de thèse mené par Emna Chebbi sous mon encadrement et la direction d'Eric Ramat. La thèse a été soutenue publiquement le 18 octobre 2019 à l'ULCO. Elle porte sur une approche de conception et d'évaluation de protocole de communication qui vise à cumuler un ensemble de propriétés garanties sur un protocole, dès sa conception, obtenues à partir d'outils de modélisation formelle tels qu'Event-B, avec un ensemble d'indicateurs de performance observés en simulation grâce à la modélisation DEVS (Discrete Event System Specification). Ma conviction est que les protocoles de communication déployés au-dessus des réseaux sans fil gagneront davantage la confiance des acteurs des systèmes de transports que s'il est possible de présenter en même temps à la fois les indicateurs de performance et les preuves que certaines propriétés essentielles à la sécurité et à la sûreté seront respectées. Ces travaux sont en cours et ont déjà conduit à plusieurs publications. Le but initial était

de concevoir un environnement de développement qui permettrait à un concepteur de modéliser formellement le protocole pour obtenir des preuves formelles de propriétés, et de projeter ensuite l'ensemble dans une modélisation basée sur la simulation à événements discrets où il pourrait être couplé à des modèles de mobilité, de trafic, de propagation, etc, afin de réaliser une simulation réaliste du système et obtenir à la fois une vérification du fait que les propriétés sont bien respectées quel que soit le scénario, ainsi que l'observation des indicateurs de performance souhaités. Les propriétés qui nous intéressent en priorité sur les protocoles sont celles liées à la sécurité, la sûreté, la qualité de service, la convergence et la stabilité de la structure obtenue grâce à l'organisation imposée par le protocole. Une première application de ces travaux a été faite sur le protocole développé dans la thèse de Lucas Rivoirard [5, 6]. Nous poursuivons ces travaux avec le postdoc recruté sur le CPER ELSAT2020, notamment pour des applications sur l'évaluation de systèmes d'objets connectés pour l'industrie, la logistique et les transports. Un des principaux verrous auxquels je dois encore m'atteler dans le développement de cette approche est la représentation des obligations de preuves qui nécessitent une preuve interactive dans une forme qui soit appropriée à leur transfert dans un modèle de simulation DEVS.

## A.6 Encadrement doctoral et scientifique (15)

Je reprends ci-après une quinzaine de travaux que j'ai encadrés de la définition du sujet de recherche scientifique ou technique à l'évaluation des réalisations.

### A.6.1 Encadrement de thèses de doctorat (4)

1. **Thèse de Valentin Mullet (2019-2022)**
   - Formation d'origine : Master Informatique, Université du Littoral Côte d'Opale
   - Etablissement d'inscription : Université du Littoral Côte d'Opale
   - Sujet de thèse : "Intégration d'une solution blockchain dans le système global de traçabilité d'une usine opérationnelle". Thèse réalisée dans le cadre d'un projet industriel avec VALEO.
   - Encadrement : E. Ramat, PR (Directeur 50%), **P. Sondi**, MCF (Encadrant 50%).
   - Financement : Contrat doctoral (50% FEDER, 30% VALEO EEM, 20% ULCO)
2. **Thèse de Sabrine Belmekki (2019-2022)**
   - Formation d'origine : Master 3IR, Institut Galilée - Sorbonne Universités
   - Etablissement d'inscription : Université Gustave Eiffel/Université de Lille
   - Sujet de thèse : "Adaptation du clustering pour une répartition coordonnée entre communications V2V et V2I dans le routage d'applications coopératives d'automatisation de la conduite"
   - Encadrement : M. Wahl, CR (Encadrante 30%), **P. Sondi**, MCF (Encadrant 30%), C. Tatkeu, DR et D. Gruyer, DR (Directeurs)
   - Financement : Contrat doctoral (100% Université Gustave Eiffel)
3. **Thèse d'Emna Chebbi (2016-2019)**
   - Formation d'origine : Master Sécurité Réseaux et e-Santé, Université Paris 5 Descartes
   - Etablissement d'inscription : Université du Littoral Côte d'Opale

- Sujet : "De la modélisation formelle à la simulation à évènements discrets : application à la conception et l'évaluation de protocole de communication sûr et sécurisé dans les transports".
- Encadrement : E. Ramat, PR (Directeur 20%), **P. Sondi**, MCF (Encadrant 80%).
- Financement : Contrat doctoral (50% Région, 50% ULCO)
- Devenir de la doctorante : ATER à temps plein, Université Paris 5 Descartes.

4. **Thèse de Lucas Rivoirard (2015-2018)**
   - Formation d'origine : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
   - Etablissement d'inscription : IFSTTAR/Université de Lille
   - Sujet de thèse : "Modèle d'auto-organisation pour les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules : application à la perception élargie et à la localisation coopératives"
   - Encadrement : M. Wahl, CR (Encadrante 50%), **P. Sondi**, MCF (Encadrant 30%), M. Berbineau, DR et D. Gruyer, DR (Directeurs)
   - Financement : Contrat doctoral (100% IFSTTAR)
   - Devenir du doctorant : Chef de Projet en stratégie d'exploitation, CEREMA Sud-Ouest

### A.6.2 Encadrement de postdoctorants (2)

1. **Dr. Imed Abbassi (2019-2020)**
   - Sujet : "Couplage modélisation formelle et simulation pour l'évaluation de protocoles de communication sûrs et sécurisés pour les transports"
   - Institution d'exercice : Université du Littoral Côte d'Opale - LISIC EA 4491
   - Encadrement : **P. Sondi**, MCF (Encadrant 100%)
   - Financement : CPER ELSAT2020, projet SECOURT (100%)
   - Devenir du postdoctorant : Enseignant-Chercheur, Université de Monastir (Tunisie)
2. **Dr. Nicola Roberto Zema (2017-2018)**
   - Sujet : "Modélisation et évaluation par cosimulation d'un déploiement LTE-R dans un trafic ferroviaire à partir de données réelles"
   - Institution d'exercice : IFSTTAR COSYS-LEOST
   - Encadrement : M. Berbineau, DR (Superviseur 80%), **P. Sondi**, MCF (Encadrant 20%)
   - Financement : CPER ELSAT2020, projet SMARTIES (100%)
   - Devenir du postdoctorant : Maître de Conférences, Université Paris Saclay

### A.6.3 Encadrement de stages de Master (9)

1. **Ali Zein (2019)**, Ing3 à l'Université Constantine (Liban), sur la "Modélisation et simulation de scénarios mixtes communications V2V et V2I avec OPNET". Stage à l'IFSTTAR COSYS-LEOST. Encadrement : M. Wahl (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : en Entreprise au Liban.

2. **Emna Chebbi (2016)**, Master Informatique à l'Université Paris V Descartes, sur la "conception d'une plateforme connectée pour la démonstration de solutions de traçabilité en logistique intelligente". Stage à l'ULCO-LISIC EA4491. Encadrement : **P. Sondi** (50%), A. Ahmad (30%) et Rym Guibadj (20%). Devenir : ATER à l'Université Paris V Descartes après une thèse à l'ULCO.
3. **MingSheng Liu (2015)**, Master SMART à l'Université Lille 1, sur des "Modèles pour l'évaluation de communications ad hoc en environnement routier". Stage à l'IFSTTAR COSYS-LEOST. Encadrement : M. Wahl (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : en Entreprise en Chine.
4. **Evariste Fokam (2014)**, Ing3 à Centrale Nantes, sur la "multi-modélisation DEVS appliquée à la simulation de l'ERTMS". Stage à l'IFSTTAR COSYS-LEOST. Encadrement : M. Berbineau (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : en Entreprise en France.
5. **Oussama Bouslimi (2013)**, Master SMART à l'Université Lille 1, sur la "Co-simulation MATLAB-OPNET des communications V2V". Stage à l'IFSTTAR COSYS-LEOST. Encadrement : M. Wahl (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : en Entreprise au Canada.
6. **Loukmen Regainia (2013)**, Master IRCOMS à l'Université de Valenciennes, sur "l'intégration de traces réelles GSM-R en scénario simulé avec OPNET". Stage à l'IFSTTAR COSYS-LEOST (2019). Encadrement : M. Berbineau (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : en thèse au LIMOS.
7. **Abdoulaziz Abdel-Nasser (2012)**, Master IRCOMS à l'Université de Valenciennes, sur la "modélisation du GSM-R dans OPNET". Stage à l'IFSTTAR LEOST-ESTAS. Encadrement : G. Mariano (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : recruté par Orange Niger.
8. **Marcelin Leukam (2012)**, Master 2 Informatique à Lyon 1, sur "l'évaluation de l'impact des erreurs de géolocalisation par satellite sur le guidage des trains ERTMS". Stage à l'IFSTTAR-LEOST (2019). Encadrement : J. Marais (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : Assystem France.
9. **Hanene Gabteni (2011)**, Master IRCOMS à l'Université de Valenciennes, sur "l'adaptation du protocole OLSR à la mobilité et évaluation avec 802.11p". Stage à l'Université de Valenciennes-LAMIH. Encadrement : D. Gantsou (50%) et **P. Sondi** (50%). Devenir : thèse à l'UAH.

## A.7 Responsabilités scientifiques (5 projets)

Je suis à l'initiative ou j'ai été invité à porter la participation scientifique et technique de l'ULCO dans le cadre de plusieurs projets scientifiques. En particulier, je suis à l'origine de la mise en place d'une convention de collaboration sur 10 ans (2015-2025) entre Université Gustave Eiffel et ULCO qui protège nos résultats communs. Des moyens humains, matériels et financiers ont été obtenus grâce à ces projets.

1. **SLEMBI (2020-2022)**
   - Intitulé : Simulation hybride Logiciel/Matériel pour la conception de Brouillages Intelligents.
   - Partenaires : MC2 Technologies, Univ. Gustave Eiffel Cosys-LEOST, ULCO-LISIC EA4491
   - Financement : AAP Industrie du Futur de la Région Hauts-de-France
   - Budget global : 300 k€

- Mon rôle : co-rédacteur du projet et porteur de la participation de l'ULCO.

2. **ETAPLES 4.0 (2019-2022)**
   - Intitulé : Evolution de la Traçabilité et l'exploitAtion des données vers l'Industrie 4.0 avec intégration des outils grouPe et maintien en condition opérationnelLE Sécurisée
   - Partenaires : VALEO EEM, ULCO-LISIC EA4491
   - Financement : AAP Industrie du Futur de la Région Hauts-de-France
   - Budget global : 298 k€
   - Mon rôle : co-rédacteur et coordinateur scientifique du projet.
3. **CPER ELSAT2020 (2015-2022)**
   - Intitulé : Cyber sécurité des Communications V2X et gestion des crises (projet SECOURT)
   - Partenaires : UPHF, Univ. Gustave Eiffel, Univ. Lille, ULCO, IMT Lille, IEMN, Univ. Artois
   - Financement : Europe, Etat Français et Région Hauts-de-France
   - Mon rôle : co-rédacteur du projet SECOURT et porteur de la participation de l'ULCO.
4. **Bonus Qualité Recherche 2015 (2015-...)**
   - Intitulé : Plateforme connectée pour la logistique intelligente
   - Partenaires : projet interne au LISIC (R. Guibadj, A. Ahmad et **P. Sondi**)
   - Financement : Université du Littoral Côte d'Opale
   - Budget global : 15 k€
   - Mon rôle : co-rédacteur et coordinateur scientifique du projet
5. **ANR VEGAS (2012-2016)**
   - Intitulé : Virtual lab based on co-simulation to include impairments of wireless tElecommunication such as GSM-R in the evAluation of ERTMS components
   - Partenaires : IFSTTAR LEOST/ESTAS, UTC-Heudiasyc, ULCO-LISIC et ERSA France
   - Financement : ANR AAP Transport Durable et Mobilité (TDM 2012), labéllisé par i-Trans
   - Budget global : 1,4 M€
   - Mon rôle : co-rédacteur et coordinateur technique du projet

## A.8 Valorisation, rayonnement et diffusion

### A.8.1 Valorisations

- Valorisation en cours d'un service de communications pour les applications véhiculaires (CBL-V2V) avec la SATT Nord en 2019 dans le cadre de la convention Université Gustave Eiffel-ULCO sur les résultats de la thèse de Lucas Rivoirard. Dépôt APP N° FR001490008000SP201800010200.
- Logiciel de co-simulation réalisé dans l'ANR VEGAS en 2016 pour synchroniser le simulateur ERTMS d'ERSA France et OPNET. Partenariats en négociation (SNCF R&D, Clearsy, etc).

### A.8.2 Rayonnement

- Participation à des jurys de thèse en tant qu'examinateur : Thèse d'Emna Chebbi (soutenue le 18 octobre 2019), Thèse de Lucas Rivoirard (soutenue le 21 septembre 2018).
- Participation aux activités du GIS Cybcom (Cybersécurité des Communications sans-fil)
- Evaluation de projets pour l'ANR depuis 2017.
- Expertises techniques sur OPNET et OpenAirInterface 5G en appui à des projets de recherche (Projet européen Shift2Rail/Emulradio4Rail)
- Relecteur régulier pour des revues internationales : Ad hoc Networks (Elsevier), Transportation Research Part C (Elsevier), Telecommunication Systems (Springer), IEEE Communication Letters, International Journal of Communication Systems, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Concurrency and Computation : Practice and Experience (Wiley), IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vehicular Communications (Elsevier), IEEE Access, Applied Sciences (MDPI), Sensors (MDPI).
- Membre de comités de programme (TPC) de conférences internationales : IEEE RailWay Rose 2018, MSPN 2019, IWVSC 2019, MLN 2020.

### A.8.3 Diffusion

Mes activités de recherche impliquent du suivi de projets et des réalisations de plateformes chronophages. Néanmoins, outre la présentation à des conférences, j'ai pu mener quelques actions locales :

- Organisation du séminaire "Wavely, AI and machine learning based sensing solutions" au LISIC le 14/11/2019 pour favoriser des collaborations industrielle. Présenté par Naim Harb de Wavely.
- Organisation du séminaire de restitution du projet Bonus Qualité Recherche 2015 au LISIC le 2/02/2017 intitulé "plateforme connectée pour la démonstration de solutions en logistique intelligente". Présenté par Rym Guibadj, Adeel Ahmad et **Patrick Sondi**.
- Organisation du workshop de restitution du projet ANR VEGAS à l'IFSTTAR Lille le 23/05/2016 intitulé "plateforme basée sur la cosimulation pour l'évaluation de l'ERTMS".
- Présentation d'un séminaire au LAMIH le 28/04/2016 "Modelling and simulation of applications based on V2V and V2I communications in transportation systems"
- Présentation à la journée ConecsSdf (GDR Macs) le 21/06/2013 "Vers un routage à qualité de service plus efficient dans les réseaux ad hoc grâce à une conception cross-layer plus efficace".
- Présentation d'un séminaire au LISIC le 21/03/2013 "Vers un laboratoire virtuel pour l'évaluation des composants ERTMS".

## A.9 Enseignements

J'ai commencé à enseigner dès le DEA (UML 2.0 à Supinfo Paris Valenciennes) en 2006, puis en tant que Moniteur durant ma thèse. Je reprends ci-après tous les modules enseignés depuis la thèse, y compris ceux amorcés avant mais qui se sont poursuivis après.

### A.9.1 Liste de modules enseignés

**A l'Université du Littoral Côte d'Opale (2013-2020)**

| Module | Formation | Interventions | ETD | Années |
|---|---|---|---|---|
| Réseaux et Sécurité | Master 2 Informatique | CM/TD/TP | 23 | 2013-2020 |
| Objets intelligents | ING3 Informatique Eilco | CM/TD/TP | 30 | 2019-2020 |
| Systèmes Réseaux et Sécurité | Master 1 Informatique | CM/TP | 21 | 2015-2020 |
| Compilation | Master 1 Informatique | CM/TD/TP | 42 | 2014-2018 |
| Administration Systèmes et Réseaux | L3 Informatique | CM/TP | 36 | 2015-2020 |
| Réseaux | L3 Informatique | CM/TD/TP | 52.5 | 2013-2020 |
| Systèmes d'exploitation | L2 Informatique | TP | 12 | 2013-2014 |
| Assembleur | L1 MSPI | TP | 18 | 2014-2015 |
| Fondement de l'algorithmique | L1 MSPI | CM/TD | 32 | 2013-2014 |

**A l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (2010-2013)**

| Module | Formation | Interventions | ETD | Années |
|---|---|---|---|---|
| Optimisation/simulation des réseaux | Master 2 Informatique | CM/TD/TP | 41 | 2010-2013 |
| Réseaux avancés et Internet ambiant | Master 2 Informatique | TD/TP | 12 | 2008-2012 |
| Principes de la sécurité informatique | Master 2 Informatique | TP | 8 | 2009-2011 |
| Initiation aux réseaux | Master 2 CCI | TP | 6 | 2009-2011 |
| Introduction à la sécurité | M1 Informatique | TD | 12 | 2009-2011 |
| Systèmes et programmation répartis | M1 Informatique | TD/TP | 16 | 2007-2011 |
| Bases de données | L3 Informatique | TD/TP | 24 | 2010-2011 |
| Systèmes d'exploitation | L3 Pro Réseaux Télécom | TD/TP | 25.5 | 2006-2012 |
| Interconnexion des réseaux | L3 Pro Réseaux Télécom | CM/TD/TP | 46 | 2010-2012 |
| Algorithmique et programmation | DUT Informatique | TP | 28 | 2012-2013 |

### A.9.2 Charges annuelles de service

| Etablissement | Année universitaire | H ETD |
|---|---|---|
| Université du Littoral Côte d'Opale | 2019 - 2020 | 356 |
| Université du Littoral Côte d'Opale | 2018 - 2019 | 327 |
| Université du Littoral Côte d'Opale | 2017 - 2018 | 335 |
| Université du Littoral Côte d'Opale | 2016 - 2017 | 312 |
| Université du Littoral Côte d'Opale | 2015 - 2016 | 376 |
| Université du Littoral Côte d'Opale | 2014 - 2015 | 241 |
| Université du Littoral Côte d'Opale | 2013 - 2014 | 114 |
| Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis Vacataire | 2012 - 2013 | 100 |
| Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis Vacataire | 2011 - 2012 | 100 |
| Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis ATER | 2010 - 2011 | 192 |

J'ai bénéficié à mon recrutement d'une décharge de service durant mon année de stage (2013-2014). Outre mes activités de recherche, j'assure depuis 2014 un volume horaire d'enseignements et autres activités pédagogiques presque le double du service statutaire.

Je participe à l'effort avec les collègues pour absorber le surcroît de charge, notamment en ce qui concerne le suivi des apprentis en Entreprise.

## A.10 Responsabilités pédagogiques et collectives

A l'exception de l'année universitaire de mon recrutement (2013-2014) où j'ai été dispensé de responsabilités pédagogiques afin de me permettre de me concentrer sur un rapprochement thématique et sur l'intégration du LISIC au projet ANR VEGAS et au projet CPER ELSAT2020, j'assume depuis 2014 et de manière **ininterrompue** les responsabilités ci-après :

- Responsable du Master 1 Informatique, parcours Ingénierie du Logiciel Libre (par apprentissage), de 2014 à ce jour
- Membre du Conseil de Département Informatique, de 2014 à ce jour
- Membre des jury de Licence et Master Informatique, de 2014 à ce jour
- Suivi d'apprentis en Entreprise (6 apprentis par an de 2014 à 2018, puis 10 par an depuis 2018)

Je représente le Département informatique à certains forums des métiers depuis 2014. J'ai été Membre d'un Comité de Sélection pour un poste de CTER en section 27 (Le Mans Université) en 2020.

Il est à noter que pour l'année 2015-2016, j'ai assumé en plus la responsabilité du Master 2 Informatique parcours I2L (par apprentissage) ainsi que la responsabilité pédagogique globale du Master Informatique par apprentissage suite à un départ en délégation du collègue titulaire pour une durée d'un an (voir tableau des charges). Il est à noter que cette charge a eu un impact sur ma production en termes de publication en 2015-2016, mais pas sur mon implication dans les projets de recherche.

La plateforme connectée réalisée avec les fonds du BQR 2015 pour la démonstration de solutions en logistique intelligente sert également aux enseignements. Les équipements réseaux (commutateurs, routeurs, points d'accès sans fil) servent en cours de Réseaux en Licence et Réseaux et Sécurité en Master. Les objets connectés et l'ensemble RFID (tags et lecteurs) servent dans le cours Objets intelligents dispensé en ING3 à l'Eilco.

J'ai également obtenu en 2019, par l'entremise d'un ancien apprenti du Master Informatique, un don à l'ULCO d'une quarantaine de commutateurs par Eurotunnel pour les travaux pratiques en Réseaux.

# B

# Publications

Je reprends ci-dessous toutes les publications et communications faites à partir de 2011, après la soutenance de ma thèse de Doctorat.

## B.1 Chapitre d'ouvrage

**Sondi P.**, Ramat E., Berbineau M., A Virtual Laboratory as an Assessment Tool for Wireless Technologies in Railway Systems, in Networking Simulation for Intelligent Transportation Systems : High Mobile Wireless Nodes, pp.79-105, Wiley  Sons, 2017.

## B.2 Revues internationales avec comité de lecture

9 revues internationales publiées à partir de 2011, après la thèse.

M. Wahl, **P. Sondi** and L. Rivoirard. Enhanced CBL Clustering Performance vs GRP, OLSR and AODV in Vehicular Ad hoc Networks. Springer Telecommunication Systems Journal, 2020.

Rivoirard L., Wahl M. and **Sondi P.** Multipoint Relaying Versus Chain-Branch-Leaf Clustering Performance in Optimized Link State Routing-Based Vehicular Ad Hoc Networks, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019.

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Marion Berbineau, and Dominique Gruyer. Chain-Branch-Leaf : a Clustering Scheme for Vehicular Networks Using Only V2V Communications, Ad Hoc Networks Journal, vol. 68, pp. 70-84, 2018.

Chebbi E., **Sondi P.** and Ramat E. From Formal Modeling to Discrete Event Simulation : Application to the Design and Evaluation of a Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks, International Journal On Advances in Networks and Services, vol.11 n° 12, 2018.

**Patrick Sondi**, Martine Wahl, Lucas Rivoirard and Ouafae Cohin. Performance Evaluation of 802.11p- Based Ad Hoc Vehicle-to-Vehicle Communications for Usual Applications Under Realistic Urban Mobility, International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 7 no. 5, Jan 2016.

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Marion Berbineau, and Dominique Gruyer. Using Real-World Car Traffic Dataset in Vehicular Ad Hoc Network Performance Evaluation, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 7, no. 12, pp. 390–398, Dec 2016.

Cohin O. and **Sondi P.** Internet of Things for Smart Factory, IEEE COMSOC MMTC E-Letter, Vol. 10, No. 5, September 2015.

**Sondi P.**, Gantsou D. and Lecomte S. A Multiple-Metric QoS-Aware Implementation of the Optimized Link State Routing Protocol, Int. J. Communication Networks and Distributed Systems (IJCNDS), vol. 12(4), 2014.

**Sondi P.**, Gantsou D. and Lecomte S. Design Guidelines for Quality of Service Support in Optimized Link State Routing-Based Mobile Ad Hoc Networks, Ad Hoc Network, Vol. 11, pp. 298-323, 2013.

## B.3 Conférences internationales avec actes et comité de lecture

12 présentations à des conférences internationales depuis 2011, après la thèse.

**Patrick Sondi**, Lucas Rivoirard, Martine Wahl. Supporting Multiple Cooperative Applications through Vehicle-to-Vehicle Communications. 2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), Paris, France, 2019.

Chebbi E., **Sondi P.**, Ramat E. A Formal Model for the Chain-Branch-Leaf Clustering Scheme in OLSR based Vehicular Ad hoc Networks using Event-B, Procedia Computer Science, Volume 151, Pages 935-940, 2019.

**Patrick Sondi**, Lucas Rivoirard, Martine Wahl. Performance Evaluation of Vehicle-to-Vehicle Communications for a Collective Perception Application in Vehicular Ad Hoc Networks, IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Bologna, Italy, 2018.

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Dominique Gruyer, and Marion Berbineau. A Cooperative Vehicle Ego-localization Application Using V2V Communications with CBL Clustering, 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Changshu, 2018.

Chebbi E., **Sondi P.**, Ramat E., Rivoirard L. and Wahl M. Simulation of a Clustering Scheme for Vehicular Ad Hoc Networks Using a DEVS-based Virtual Laboratory Environment, ANT-2018-the 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, Porto, Procedia Computer Science (Elsevier), Volume 130, Pages 344-351, 2018.

Chebbi E., **Sondi P.** and Ramat E. Enhancing Formal Proofs of Network Protocols for Transport Systems using Discrete Event Simulation, SIMUL 2017-the Ninth International Conference on Advances in System Simulation, Athens, 2017.

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Marion Berbineau, and Dominique Gruyer. From Multipoint Relaying to Chain-Branch-Leaf : Improving the Clustering in OLSR for Vehicular Ad hoc Networks, the 24th IEEE SCVT symposium, Leuven, 2017.

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Marion Berbineau, and Dominique Gruyer. CBL : A Clustering Scheme for VANETs, the Sixth International Conference on Advances in Vehicular Systems, Technologies and Applications, Nice, 2017. (**Best paper award**)

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Marion Berbineau, and Dominique Gruyer. Performance evaluation of AODV, DSR, GRP and OLSR for VANET with real-world trajectories, 15th International Conference on ITS Telecommunications, Warsaw, 2017.

**Sondi P.**, Gantsou D. Improving Real-Time Video Streaming Delivery over Dense Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks, IEEE/IFIP Wireless Days 2014, Rio de Janeiro, 2014.

Gantsou D. and **Sondi P.** Toward a Honeypot Solution for Proactive Security in Vehicular Ad Hoc Networks, 8th FTRA International Conference on Future Information Technology (FutureTech 2013), vol. 276, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Gwangju, South KOREA, pp. 145-150, 2014.

**Sondi P.**, Kassab M., Berbineau M., Aguado M. and Lemaire E. Toward a Common Platform for Simulation-Based Evaluation of Both Functional and Telecommunication Subsystems of the ERTMS, Joint Rail Conference (JRC) 2012, Philadelphia, USA, 2012.

## B.4 Workshops internationaux avec actes et comité de lecture

6 présentations à des workshops internationaux depuis 2011, après la thèse.

Sabrine Belmekki, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Dominique Gruyer, Charles Tatkeu. Toward the integration of V2V based clusters in a global infrastructure network for vehicles. Accepted at the 15th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles Nets4Cars/Nets4Trains/Nets4Aircraft, Bordeaux, France, 2020.

Rivoirard L., Wahl M. and **Sondi P.** Véhicules coopératifs et communicants : application à la perception élargie, RFTM 2019, 2èmes Rencontres Francophones Transport Mobilité, Montréal, 2019.

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Marion Berbineau, and Dominique Gruyer. A new clustering structure for VANET, the 7th Transport Research Arena, Vienna, 2018.

Chebbi E., **Sondi P.** and Ramat E. Vérification de propriétés d'une méthode de clustering pour réseaux de véhicules par la simulation à événements discret, Journées DEVS francophones 2018, Cargèse, 2018.

**Sondi P.**, Berbineau M., Kassab M., Wahl M., Gransart C., Lemaire E., Mariano G., Ghazel M., Benard V., Schön W. Virtual lab based on co-simulation to include impairments of wireless telecommunication such as GSM-R in the evaluation of ERTMS, TRA - Transport Research Arena, Apr 2014, 10p, Paris, France, 2014.

**Sondi P.**, Berbineau M., Kassab M. and Mariano G. Generating Test Scenarios Based on Real-World Traces for ERTMS Telecommunication Subsystem Evaluation, Nets4Cars-Nets4Trains, LNCS 7865, pp223-231, Springer-verlag, 2013.

## B.5 Congrès nationaux avec actes et comité de lecture

2 communications dans une conférence nationale, après la thèse.

Rivoirard L., Wahl M. and **Sondi P.** Modèle d'auto-organisation pour réseaux ad hoc véhiculaires : application à la perception élargie coopérative, 46ème Congrès les Rencontres De la Mobilité Intelligente (RDMI 2019), ATEC ITS France, Paris, 2019.

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, **Patrick Sondi**, Marion Berbineau, and Dominique Gruyer, "Proposition d'une structuration dynamique d'un réseau de communication intervéhiculaire pour les ITS", Rencontres de la Mobilité intelligente (ATEC ITS), Paris, 2018.

# Conclusion et perspectives générales

Au cours des dix dernières années, mes activités de recherche se sont construites au gré des postes sur lesquels j'ai été recruté et de ma volonté active de maintenir mes travaux dans le thème de l'ingénierie de protocoles de communications pour les transports. Sur les aspects liés à la conception de protocoles, mes contributions principales ont été décrites aux chapitres 2 et 3 de la première partie. La première contribution a porté sur un modèle d'auto-organisation proposé dans le cadre d'une thèse que j'ai co-encadrée et qui permet de faire émerger une infrastructure virtuelle dans un réseau de véhicules en s'appuyant uniquement sur des communications véhicules-à-véhicules. L'objectif de cette structuration était de pallier l'absence d'infrastructure de communications et de fournir tous les modes de communications nécessaires à la continuïté des applications coopératives sur la route, entre véhicules pilotés et autonomes, dans les zones non équipées. En effet, la multiplication d'applications d'aide à la conduite et d'applications coopératives qui dépendent de communications entre le véhicule et des tiers (V2X) va conditionner les usagers à terme. Dans le cas du véhicule autonome, elle rend même les communications indispensables au maintien de certaines fonctionnalités. Grâce à ce modèle d'auto-organisation, il devient possible de mettre en place une solution de communications ad hoc qui permet la continuïté de ces applications, même en mode dégradé, dans des contextes dépourvus d'infrastructure. La seconde contribution améliore l'approche de conception suivie dans la première, essentiellement guidée par les besoins fonctionnels du protocole à concevoir, grâce aux méthodes formelles. Dans le cadre d'une thèse que j'ai encadrée, nous avons montré comment certains besoins fonctionnels qui s'y prêtent peuvent être exprimés comme des propriétés du protocole de communications ou du système dans lequel il est utilisé. Le recours aux outils formels tels qu'Event-B permet de vérifier et de valider immédiatement en phase de conception les propriétés souhaitées. Appliquée au modèle d'auto-organisation proposé en amont, cette approche a permis notamment d'exprimer et de vérifier des propriétés sur les relations entre les véhicules qui forment l'infrastructure virtuelle (noeuds branche) et ceux qui s'y rattachent (noeuds feuilles), ainsi que les règles qu'ils doivent respecter dans le déclenchement de certains événements selon qu'ils sont en amont ou en aval du trafic routier. Dans les transports, domaine sensible à la sûreté, le rôle crucial joué par les communications impose qu'il soit appliqué aux protocoles de communications des méthodes de conception rigoureuses qui permettent d'obtenir des garanties sur des propriétés considérées comme indispensables à la mise en oeuvre de certaines fonctionnalités.

Sur les aspects liés à l'évaluation, mes contributions ont été disséminées à travers les

trois chapitres de la première partie de ce manuscrit. Dans un premier temps, j'ai développé une approche basée sur la cosimulation pour évaluer toute technologie de communications prise sur étagère dans une infrastructure dédiée au transport ferroviaire pour assurer les communications entre les trains et le centre de contrôle. Cette approche, développée pour évaluer des technologies candidates au remplacement du GSM-R dans l'ERTMS, se matérialise par un laboratoire virtuel connectant un simulateur de trafic ferroviaire et un simulateur de réseaux de communications (OPNET). L'originalité de la solution présentée au chapitre 1 est qu'elle permet d'intégrer à l'évaluation des communications un scénario de trafic ferroviaire réaliste où le centre de contrôle (applicatifs, RBC, etc), les voies et les éléments de signalisation statiques (balises, feux, panneaux, etc), les trajectoires des trains et les messages échangés sont générés par un simulateur de trafic ferroviaire éprouvé et utilisé notamment dans la recherche et dans la formation de conducteurs. Grâce à la cosimulation, les éléments du scénario ferroviaire susceptibles d'affecter les communications sont transmis au simulateur de réseaux afin qu'ils soient pris en compte dans la simulation des communications, et les données sur les impacts observés sont notifiés en retour au simulateur de trafic ferroviaire. En complément, j'ai également présenté ma contribution à l'élaboration de scénarios ferroviaires à partir de traces réelles de communications collectées sur une infrastructure opérationnelle et fournies notamment par des opérateurs et industriels du secteur. Il est donc désormais possible d'évaluer n'importe quelle technologie candidate en lieu et place du GSM-R sur les mêmes scénarios que ce dernier, et de pouvoir comparer l'ensemble des résultats avec des traces réelles, renforçant ainsi la fiabilité du laboratoire virtuel proposé. L'ouverture déjà effective de ce type de données par RFF et par la SNCF contribuera au développement de cette approche. Poursuivant dans cet objectif de réaliser des simulations réalistes au possible, une grande partie du travail dans la thèse que j'ai co-encadrée et qui est présentée au chapitre 2, a consisté à développer une plateforme de simulation très complète pour l'évaluation du modèle d'auto-organisation proposé dans la thèse. Outre des modèles de mobilité générés avec SUMO, notamment à partir de traces réelles de circulation de véhicules sur des autoroutes et routes de la région, nous avons intégré des modèles de propagation adéquats en fonction des scénarios de trafic routier simulés. L'évaluation structurelle réalisée avec Matlab, afin d'observer les performances du modèle d'auto-organisation, est complétée par une évaluation système avec OPNET où le trafic lié au routage ainsi que celui des applications coopératives peuvent être finement modélisés et simulés. Ces évaluations ont permis de montrer que la structure créée par le modèle d'organisation est stable, qu'elle permet de réduire fortement le trafic de routage comparativement aux protocoles de routage ad hoc classiques et qu'elle offre des performances adapées aux applications coopératives considérées. L'approche de conception basée sur les méthodes formelles présentée ci-avant permet d'effectuer une première forme d'évaluations qui consiste à vérifier et valider les propriétés exprimées sur le modèle du protocole de communications et du système de transport dans lequel il est utilisé. Néanmoins, malgré la capacité des outils formels à réaliser des preuves automatiques, certaines propriétés nécessitent une preuve interactive impliquant un expert. Dans le cadre de la thèse que j'ai encadrée et qui est présentée au chapitre 3, nous avons entamé le développement d'une approche qui vise à substituer à l'expert des connaissances obtenues grâce à la simulation. Pour atteindre cet objectif, notre démarche procède par une première étape qui consiste à élaborer, dans un environnement de modélisation et de simulation à événements discrets, des modèles du protocole et du système équivalents à leurs modèles formels. Ce travail, en grande partie réalisé durant la thèse, est présenté dans ce manuscrit.

A court terme, une perspective ouverte par ces travaux et qui est déjà en cours de développement dans le cadre d'une thèse que je co-encadre depuis 2019, porte sur l'intégration de composantes gérées par un modèle d'auto-organisation dans un ensemble plus large incluant une infrastructure. Un cas d'usage correspondant est le scénario où des véhicules circulant sur des sections non couvertes arrivent dans une zone de couverture. L'intégration de communications V2V en natif dans le fonctionnement de la 5G laisse moins de places à une possible standardisation de solutions concurrentes. Néanmoins, il peut s'avérer utile de poursuivre ces travaux en s'inscrivant dans les cadres de fonctionnement fixés par la 5G en perspective d'une possible intégration des solutions envisagées dans le standard. Cette dernière observation s'applique également à la seconde perspective, à moyen et long termes, qui concerne la seconde étape de notre approche d'évaluation couplant modélisation formelle et simulation à événements discrets. En effet, il s'agit de développer des concepts et des mécanismes appropriés pour représenter les obligations de preuves résiduelles (non prouvées automatiquement) sous une forme qui permette de les transférer de la modélisation formelle vers des modèles DEVS équivalents. Les recherches dans ce sens sont ouvertes, mais l'idée qui les sous-tends peut être exprimée simplement ainsi : si la modélisation est construite de manière à ce que certaines variables expriment des questions, alors la simulation permettra d'y répondre en isolant les valeurs admissibles pour ces variables dans la variété des scénarios simulés. Parmi les pistes à explorer figure le calcul des prédicats. En fonction de l'espace laissé par la 5G, il n'est pas exclu que nos contributions soient déplacées du routage vers les couches plus hautes (transport, application), voire restreintes à l'étude de certains aspects uniquement, notamment la qualité de service et la sécurité. Je co-encadre actuellement une autre thèse démarrée en 2019 sur la mise en oeuvre de la blockchain dans un système de traçabilité d'une usine opérationnelle. La solution envisagée pourrait être transposée à un protocole de gestion de la non-répudiation des échanges effectués dans les phases de communications V2V. La conception et l'évaluation de ce protocole pourraient être menées avec les méthodes développées dans l'approche couplant modélisation formelle et simulation à événements discrets susmentionnée.

# Références bibliographiques


[1] L. Rivoirard, *Modèle d'auto-organisation pour les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules : application à la perception élargie et à la localisation coopératives*. PhD thesis, 2018. Thèse de doctorat dirigée par Gruyer, Dominique-Berbineau, MarionWahl, Martine et Sondi Obwang, Patrick Sciences et technologies de l'information et de la communication Lille 1 2018.

[2] L. Rivoirard, M. Wahl, and P. Sondi, "Multipoint relaying versus chain-branch-leaf clustering performance in optimized link state routing-based vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1034–1043, 2020.

[3] P. Sondi, L. Rivoirad, and M. Wahl, "Supporting multiple cooperative applications through vehicle-to-vehicle communications," in *2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, pp. 1–6, 2019.

[4] E. Chebbi, P. Sondi, and E. Ramat, "Enhancing formal proofs of network protocols for transport systems using discrete event simulation," in *The 9th Int Conference on Advances in System Simulation (SIMUL2017)*, 2017.

[5] E. Chebbi, P. Sondi, E. Ramat, L. Rivoirard, and M. Wahl, "Simulation of a clustering scheme for vehicular ad hoc networks using a devs-based virtual laboratory environment," *Procedia Computer Science*, vol. 130, pp. 344 – 351, 2018. The 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018) / The 8th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2018) / Affiliated Workshops.

[6] E. Chebbi, P. Sondi, and E. Ramat, "A formal model for the chain-branch-leaf clustering scheme in olsr based vehicular ad hoc networks using event-b," *Procedia Computer Science*, vol. 151, pp. 935 – 940, 2019. The 10th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2019) / The 2nd International Conference on Emerging Data and Industry 4.0 (EDI40 2019) / Affiliated Workshops.

[7] P. Sondi, E. Ramat, and M. Berbineau, *A Virtual Laboratory as an Assessment Tool for Wireless Technologies in Railway Systems*, ch. 5, pp. 79–105. John Wiley Sons, Ltd, 2017.

[8] S. Midya and R. Thottappillil, "An overview of electromagnetic compatibility challenges in european rail traffic management system," *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 16, no. 5, pp. 515 – 534, 2008.

[9] O. Levêque and P. De Cicco, *ETCS Implementation Handbook*. Infrastructure Department UIC, 2008.

[10] J. Beugin and J. Marais, "Simulation-based evaluation of dependability and safety properties of satellite technologies for railway localization," *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 22, pp. 42 – 57, 2012.

[11] C. des Comptes Européenne, "Un système européen de gestion du trafic ferroviaire unique." `https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/55291f49-bd24-11e7-a7f8-01aa75ed71a1`, 2017.

[12] J. M. Mera, I. Gomez-Rey, and A. Campos, "ERTMS/ETCS test simulation bench," in *Urban Transport XIII : Urban Transport and the Environment in the 21st Century*, WIT press, 2007. `https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/96/18152`.

[13] UNISIG, "System requirements specification, ertms specifications, subset 026 v2.3.0." `https://www.era.europa.eu/content/set-specifications-3-etcs-b3-r2-gsm-r-b1_en`, 2010.

[14] S. F. Ruesche, J. Steuer, and K. Jobmann, "The european switch," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 37–46, 2008.

[15] M. Aguado, I. L. Samper, M. Berbineau, and E. Jacob, "4G communication technologies for train to ground communication services : LTE versus WIMAX, a simulation study," 9th World Congress on Railway Research, Lille, pp. 626–629, 5 2011.

[16] C. Pinedo, M. Aguado, I. Lopez, and J. Astorga, "Modelling and simulation of ertms for current and future mobile technologies," *International Journal of Vehicular Technology*, vol. 2015, 2015.

[17] A. Sniady and J. Soler, "LTE for Railways : Impact on Performance of ETCS Railway Signaling," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 69–77, 2014.

[18] R. Canonico, S. Marrone, R. Nardone, and V. Vittorini, "A Framework to Evaluate 5G Networks for Smart and Fail-Safe Communications in ERTMS/ETCS," pp. 34–50, 10 2017.

[19] *Toward a Common Platform for Simulation-Based Evaluation of Both Functional and Telecommunication Sub-Systems of the ERTMS*, vol. 2012 Joint Rail Conference of *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, 04 2012.

[20] A. Sniady and J. Soler, "An overview of GSM-R technology and its shortcomings," pp. 626–629, 11 2012.

[21] *Generating Test Scenarios Based on Real-World Traces for ERTMS Telecommunication Subsystem Evaluation*, vol. Nets4Cars/Nets4Trains 2013 of *Lecture Notes in Computer Science, vol 7865. Springer, Berlin, Heidelberg*, 2013.

[22] R. Protzmann, B. Schünemann, and I. Radusch, *Simulation of Convergent Networks for Intelligent Transport Systems with VSimRTI*, ch. 1, pp. 1–28. John Wiley Sons, Ltd, 2017.

[23] S. C. Dutilleul, T. Lecomte, and A. B. Romanovsky, eds., *Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification - Third International Conference, RSSRail 2019, Lille, France, June 4-6, 2019, Proceedings*, vol. 11495 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2019.

[24] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau, and D. Gruyer, "Chain-branch-leaf : A clustering scheme for vehicular networks using only v2v communications," *Ad Hoc*

*Networks*, vol. 68, pp. 70–84, 2018. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.10.007.

[25] A. Katiyar, D. Singh, and R. Yadav, "State-of-the-art approach to clustering protocols in vanet : a survey," *Wireless Networks*, june 2020.

[26] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4, RFC 4728," February 2007. https://doi.org/10.17487/RFC4728.

[27] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das, *et al.*, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, RFC 3561," July 2003. https://doi.org/10.17487/RFC3561.

[28] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsdv) for mobile computers," in *ACM SIGCOMM computer communication review*, vol. 24, pp. 234–244, ACM, 1994. https://doi.org/10.1145/190314.190336.

[29] T. Clausen, P. Jacquet, C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, and L. Viennot, "Optimized link state routing protocol (olsr)," Tech. Rep. RFC 3626, 2003. https://doi.org/10.17487/RFC3626.

[30] N. Chakchouk, "A survey on opportunistic routing in wireless communication networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2214–2241, 2015.

[31] G. Y. Li, *Adaptive and Opportunistic QoS-based Routing Protocol in VANETs*. Theses, Université Paris Sud - Paris XI, July 2015.

[32] S. Boussoufa-Lahlah, F. Semchedine, and L. Bouallouche-Medjkoune, "Geographic routing protocols for vehicular ad hoc networks (vanets) : A survey," *Vehicular Communications*, vol. 11, pp. 20 – 31, 2018. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.01.006.

[33] L. Zhiyuan, "Geographic routing protocol and simulation," in *Computer Science and Engineering, 2009. WCSE'09. Second International Workshop on*, vol. 2, pp. 404–407, IEEE, 2009. https://doi.org/10.1109/WCSE.2009.840.

[34] "Intelligent Transport Systems (ITS) ; vehicular communications ; geonetworking ; part 2 :scenarios," Technical Report ETSI EN 302 636-2 V1.2.0 (2013-07), 2013. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263602/01.02.00_20/en_30263602v010200a.pdf.

[35] E. T. C. I. T. System, "Intelligent transport systems (its) ; vehicular communications ; basic set of applications ; part 2 : Specification of cooperative awareness basic service," Technical Report ETSI EN 302 367-2 V1.3.2 (2014-11), 2014. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.03.02_60/en_30263702v010302p.pdf.

[36] E. T. C. I. T. System, "Intelligent transport systems (its) ; vehicular communications ; basic set of applications ; part 3 : Specifications of decentralized environmental notification basic service," Technical Report ETSI EN 302 367-3 V1.2.2 (2014-11), 2014. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.03.02_60/en_30263702v010302p.pdf.

[37] Q. Lin, C. Li, X. Wang, and L. Zhu, "A three-dimensional scenario oriented routing protocol in vehicular ad hoc networks," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th*, pp. 1–5, IEEE, 2013. https://doi.org/10.1109/vtcspring.2013.6691848.

[38] Y. Li, D. Jin, Z. Wang, L. Zeng, and S. Chen, "Exponential and power law distribution of contact duration in urban vehicular ad hoc networks," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 110–113, 2013. https://doi.org/10.1109/lsp.2012.2231412.

[39] I. B. Jemaa, *Multicast Communications for Cooperative Vehicular Systems*. PhD thesis, Mines ParisTech, 2014. https://hal.inria.fr/tel-01101679.

[40] L. Rivoirard, M. Wahl, and P. Sondi, "Multipoint relaying versus chain-branch-leaf clustering performance in optimized link state routing-based vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1034–1043, 2020.

[41] M. Wahl, P. Sondi, and L. Rivoirard, "Enhanced CBL Clustering Performance vs GRP, OLSR and AODV in Vehicular Ad hoc Networks," *Accepted by Springer Telecommunication Systems Journal*.

[42] D. LEBEDEV, *Ad Hoc Networks : Study of Protocol Behaviour*. PhD thesis, X - Polytechnique, 2006. http://www.lix.polytechnique.fr/Labo/Dmitri.Lebedev/lebedev_these.pdf.

[43] M. de la Transition écologique et solidaire, "Projet scoop." http://www.scoop.developpement-durable.gouv.fr/, 2018.

[44] C. Européenne, "Projet intercor." http://intercor-project.eu/, 2018.

[45] J. Friginal, D. de Andrés, J.-C. Ruiz, and M. Martínez, "A survey of evaluation platforms for ad hoc routing protocols : A resilience perspective," *Computer Networks*, vol. 75, pp. 395–413, 2014. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.09.010.

[46] F. J. Martinez, C. K. Toh, J.-C. Cano, C. T. Calafate, and P. Manzoni, "A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (vanets)," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 11, no. 7, pp. 813–828, 2011. https://doi.org/10.1002/wcm.859.

[47] S. Al-Sultan, M. M. Al-Doori, A. H. Al-Bayatti, and H. Zedan, "A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 37, pp. 380–392, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2013.02.036.

[48] I. S. Institute, "Ns2 documentation." https://www.isi.edu/nsnam/ns/. [En ligne], (consulté le 11 juin 2018).

[49] OpenSim, "Omnet++ documentation." https://www.omnetpp.org/. [En ligne], (consulté le 11 juin 2018).

[50] D. Krajzewicz, G. Hertkorn, C. Rössel, and P. Wagner, "Sumo (simulation of urban mobility)-an open-source traffic simulation," in *Proceedings of the 4th middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002)*, pp. 183–187, 2010. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_7.

[51] M. Di Felice, L. Bedogni, and L. Bononi, "Dynamic backbone for fast information delivery invehicular ad hoc networks : an evaluation study," in *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pp. 1–8, ACM, 2011. https://doi.org/10.1145/2069063.2069065.

[52] EstiNet, "Nctuns." http://nsl.cs.nctu.edu.tw/NSL/nctuns.html. [En ligne], (consulté le 11 juin 2018).

[53] N. Maslekar, M. Boussedjra, J. Mouzna, and H. Labiod, "C-drive : clustering based on direction in vehicular environment," in *New Technologies, Mobility and Security*

*(NTMS), 2011 4th IFIP International Conference on*, pp. 1–5, IEEE, 2011. https://doi.org/10.1109/NTMS.2011.5720653.

[54] Mathworks, "Matlab documentation." https://www.mathworks.com/help/matlab/. [En ligne], (consulté le 11 juin 2018).

[55] Riverbed, "Opnet documentation." https://www.riverbed.com/fr/products/steelcentral/opnet.html. [En ligne], (consulté le 11 juin 2018).

[56] P. Sondi, D. Gantsou, and S. Lecomte, "A multiple-metric qos-aware implementation of the optimised link state routing protocol," *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 381–400, 2014. PMID : 62227.

[57] P. Sondi, D. Gantsou, and S. Lecomte, "Performance evaluation of multimedia applications over an olsr-based mobile ad hoc network using opnet," in *Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2010 12th International Conference on*, pp. 567–572, IEEE, 2010. https://doi.org/10.1109/uksim.2010.109.

[58] V. Hnatyshin and H. Asenov, "Design and implementation of an opnet model for simulating geoaodv manet routing protocol," in *Proc. of the OPNETWORK 2010 International Conference, Session : Wireless Ad Hoc and Wireless Personal Area Networks, Washington DC*, 2010.

[59] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau, and D. Gruyer, "Using real-world car traffic dataset in vehicular ad hoc network performance evaluation," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 7, no. 12, pp. p390–398, 2016. https://doi.org/10.14569/ijacsa.2016.071251.

[60] P. Sondi, M. Wahl, L. Rivoirard, and O. Cohin, "Performance evaluation of 802.11 p-based ad hoc vehicle-to-vehicle communications for usual applications under realistic urban mobility," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, IJACSA*, vol. 7, no. 5, pp. p221–230, 2016. https://doi.org/10.14569/ijacsa.2016.070532.

[61] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau, and D. Gruyer, "Performance evaluation of AODV, DSR, GRP and OLSR for VANET with real-world trajectories," in *ITS Telecommunications (ITST), 2017 15th International Conference on*, pp. 1–7, IEEE, 2017. https://doi.org/10.1109/itst.2017.7972224.

[62] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau, and D. Gruyer, "From multipoint relaying to chain-branch-leaf : Improving the clustering in olsr for vehicular ad hoc networks," in *Communications and Vehicular Technology (SCVT), 2017 IEEE Symposium on*, pp. 1–5, IEEE, 2017. https://doi.org/10.1109/scvt.2017.8240311.

[63] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau, and D. Gruyer, "Proposition d'une structuration dynamique d'un réseau de communication intervéhiculaire pour les ITS," in *RDMI 2018, Les rencontres de la mobilité intelligente, ATEC ITS FRANCE*, (Paris, France), p. 11p, Jan. 2018.

[64] L. RIVOIRARD, M. Wahl, P. SONDI, M. Berbineau, and D. Gruyer, "A new clustering structure for VANET," in *7th Transport Research Arena TRA 2018*, (Vienna, Austria), p. 9p, 2018.

[65] L. RIVOIRARD, M. Wahl, P. SONDI, D. Gruyer, and M. Berbineau, "A cooperative vehicle ego-localization application using v2v communications with cbl clustering," in *The 29th IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (Chang Shu, China), p. 9p, IEEE, 2018.

[66] A. Daeinabi, A. G. P. Rahbar, and A. Khademzadeh, "Vwca : An efficient clustering algorithm in vehicular ad hoc networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 207–222, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2010.07.016.

[67] S. Harrabi, I. B. Jaffar, and K. Ghedira, "Novel optimized routing scheme for vanets," *Procedia Computer Science*, vol. 98, pp. 32–39, 2016. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.008.

[68] O. A. Wahab, H. Otrok, and A. Mourad, "Vanet qos-olsr : Qos-based clustering protocol for vehicular ad hoc networks," *Computer Communications*, vol. 36, no. 13, pp. 1422–1435, 2013. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2013.07.003.

[69] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau, and D. Gruyer, "CBL : A Clustering Scheme for VANETs," in *VEHICULAR 2017-The Sixth International Conference on Advances in Vehicular Systems, Technologies and Applications*, pp. pp–19, 2017. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01573625.

[70] D. Tian, Y. Wang, G. Lu, and G. Yu, "A vanets routing algorithm based on euclidean distance clustering," in *Future Computer and Communication (ICFCC), 2010 2nd International Conference on*, vol. 1, pp. V1–183, IEEE, 2010. https://doi.org/10.1109/ICFCC.2010.5497808.

[71] S.-H. Cha, J.-E. Lee, and M. Ryu, "Directed broadcasting with mobility prediction for vehicular sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, no. 7, 2016. https://doi.org/10.1177/1550147716657930.

[72] F. Bai, N. Sadagopan, and A. Helmy, "Important : A framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks," in *INFOCOM 2003. Twenty-second annual joint conference of the IEEE computer and communications. IEEE societies*, vol. 2, pp. 825–835, IEEE, 2003. https://doi.org/10.1109/infcom.2003.1208920.

[73] F. K. Karnadi, Z. H. Mo, and K.-c. Lan, "Rapid generation of realistic mobility models for vanet," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*, pp. 2506–2511, IEEE, 2007. https://doi.org/10.1109/wcnc.2007.467.

[74] M. K. Patel, "Comparative study of vehicular ad-hoc network mobility models and simulators," *International Journal of Computer Applications*, vol. 47, no. 6, pp. 38–43, 2012. https://doi.org/10.5120/7196-9967.

[75] J. Härri, F. Filali, C. Bonnet, and M. Fiore, "Vanetmobisim : generating realistic mobility patterns for vanets," in *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp. 96–97, ACM, 2006. https://doi.org/10.1145/1161064.1161084.

[76] S. Bitam and A. Mellouk, "Qos swarm bee routing protocol for vehicular ad hoc networks," in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–5, IEEE, 2011. https://doi.org/10.1109/icc.2011.5963424.

[77] J. Zheng, Y. Wu, Z. Xu, and X. Lin, "A reliable routing protocol based on qos for vanet," in *Advanced Infocomm Technology (ICAIT), 2014 IEEE 7th International Conference on*, pp. 21–28, IEEE, 2014. https://doi.org/10.1109/icait.2014.7019524.

[78] G. Li, L. Boukhatem, and S. Martin, "An intersection-based qos routing in vehicular ad hoc networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 20, no. 2, pp. 268–284, 2015. https://doi.org/10.1007/s11036-015-0577-4.

[79] Y. Sun, S. Luo, Q. Dai, and Y. Ji, "An adaptive routing protocol based on qos and vehicular density in urban vanets," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 6, p. 631092, 2015. https://doi.org/10.1155/2015/631092.

[80] A. Halati, H. Lieu, and S. Walker, "Corsim-corridor traffic simulation model," in *Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century : Challenges, Innovations, and OpportunitiesUrban Transportation Division, ASCE ; Highway Division, ASCE ; Federal Highway Administration, USDOT ; and National Highway Traffic Safety Administration, USDOT.*, 1997.

[81] Z. Wang, L. Liu, M. Zhou, and N. Ansari, "A position-based clustering technique for ad hoc intervehicle communication," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, no. 2, pp. 201–208, 2008. https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.913917.

[82] E. Teramoto, M. Baba, H. Mori, Y. Asano, and H. Morita, "Netstream : traffic simulator for evaluating traffic information systems," in *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC'97., IEEE Conference on*, pp. 484–489, IEEE, 1997. https://doi.org/10.1109/itsc.1997.660522.

[83] W. Sun, H. Yamaguchi, K. Yukimasa, and S. Kusumoto, "Gvgrid : A qos routing protocol for vehicular ad hoc networks," in *Quality of Service, 2006. IWQoS 2006. 14th IEEE International Workshop on*, pp. 130–139, IEEE, 2006. https://doi.org/10.1109/iwqos.2006.250460.

[84] S.-Y. Wang and C.-C. Lin, "Nctuns 5.0 : A network simulator for ieee 802.11 (p) and 1609 wireless vehicular network researches," in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, pp. 1–2, IEEE, 2008. https://doi.org/10.1109/vetecf.2008.464.

[85] S. Krauß, *Microscopic modeling of traffic flow : Investigation of collision free vehicle dynamics*. PhD thesis, 1998. e-archive.informatik.uni-koeln.de/319/.

[86] Z. Y. Rawashdeh and S. M. Mahmud, "A novel algorithm to form stable clusters in vehicular ad hoc networks on highways," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 1, p. 15, 2012. https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-15.

[87] M. Ren, L. Khoukhi, H. Labiod, J. Zhang, and V. Vèque, "A mobility-based scheme for dynamic clustering in vehicular ad-hoc networks (vanets)," *Vehicular Communications*, vol. 9, pp. 233–241, 2017. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2016.12.003.

[88] V. Sethi and N. Chand, "A destination based routing protocol for context based clusters in vanet," *Communications and Network*, vol. 9, no. 03, p. 179, 2017. https://doi.org/10.4236/cn.2017.93013.

[89] H. R. Arkian, R. E. Atani, A. Pourkhalili, and S. Kamali, "A stable clustering scheme based on adaptive multiple metric in vehicular ad-hoc networks," *Journal of Information Science & Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 361–386, 2015.

[90] M. Azizian, S. Cherkaoui, and A. S. Hafid, "Dcev : A distributed cluster formation for vanet based on end-to-end realtive mobility," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2016 International*, pp. 287–291, IEEE, 2016. https://doi.org/10.1109/iwcmc.2016.7577072.

[91] "Crawdad." http://www.crawdad.org/. [En ligne], (consulté le 11 juin 2018).

[92] C. Buisson, D. Villegas, and L. Rivoirard, "Using polar coordinates to filter trajectories data without adding extra physical constraints," in *Transportation Research Board 95th Annual Meeting, Transportation Research Board*, Transportation Research Board, 2016. https://trid.trb.org/view/1393268.

[93] S. Hoogendoorn, H. Van Zuylen, M. Schreuder, B. Gorte, and G. Vosselman, "Microscopic traffic data collection by remote sensing," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, no. 1855, pp. 121–128, 2003. https://doi.org/10.3141/1855-15.

[94] F. O. of Operations, "Ngsim : the next generation simulation." http://ngsim-community.org/. [En ligne], (consulté le 11 juin 2018).

[95] M. Ferreira, H. Conceiçao, R. Fernandes, and O. K. Tonguz, "Urban connectivity analysis of vanets through stereoscopic aerial photography," in *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th*, pp. 1–3, IEEE, 2009. https://doi.org/10.1109/vetecf.2009.5378962.

[96] D. Dhoutaut, A. Régis, and F. Spies, "Impact of radio propagation models in vehicular ad hoc networks simulations," in *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp. 40–49, ACM, 2006. https://doi.org/10.1145/1161064.1161072.

[97] F. J. Martinez, M. Fogue, M. Coll, J.-C. Cano, C. T. Calafate, and P. Manzoni, "Assessing the impact of a realistic radio propagation model on vanet scenarios using real maps," in *Network Computing and Applications (NCA), 2010 9th IEEE International Symposium on*, pp. 132–139, IEEE, 2010. https://doi.org/10.1109/nca.2010.24.

[98] P. K. Singh and K. Lego, "Comparative study of radio propagation and mobility models in vehicular adhoc network," *International Journal of Computer Applications (0975-8887)*, vol. 16, no. 8, 2011. https://doi.org/10.5120/2031-2600.

[99] A. Rhattoy and A. Zatni, "The impact of propagation environment and traffic load on the performance of routing protocols in ad hoc networks," *arXiv preprint arXiv :1202.1677*, 2012. https://doi.org/10.5121/ijdps.2012.3106.

[100] C. Tripp-Barba, L. Urquiza-Aguiar, A. Zaldívar-Colado, J. Estrada-Jiménez, J. A. Aguilar-Calderón, and M. A. Igartua, "Comparison of propagation and packet error models in vehicular networks performance," *Vehicular Communications*, vol. 12, pp. 1–13, 2018. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.02.001.

[101] W. Viriyasitavat, M. Boban, H.-M. Tsai, and A. Vasilakos, "Vehicular communications : Survey and challenges of channel and propagation models," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 10, no. 2, pp. 55–66, 2015. https://doi.org/10.1109/mvt.2015.2410341.

[102] A. Ashtaiwi, A. Altayesh, and K. Belghet, "Ieee 802.11 p performance evaluation at different driving environments," in *Computer Networks and Information Security (WSCNIS), 2015 World Symposium on*, pp. 1–8, IEEE, 2015. https://doi.org/10.1109/wscnis.2015.7368286.

[103] K. A. Hafeez, L. Zhao, Z. Liao, and B. N.-W. Ma, "The optimal radio propagation model in vanet," in *Systems and Networks Communications, 2009. ICSNC'09. Fourth International Conference on*, pp. 6–11, IEEE, 2009. https://doi.org/10.1109/icsnc.2009.101.

[104] Z. Amjad and W.-C. Song, "Road aware qos routing in vanets," in *Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2015 17th Asia-Pacific*, pp. 133–138, IEEE, 2015. https://doi.org/10.1109/apnoms.2015.7275415.

[105] A. Mukunthan, *Routing and propagation in urban vehicular ad hoc networks*. Thèse, University of Wollongong, Australie, Jan. 2015. http://ro.uow.edu.au/theses/4558/.

[106] K. N. Qureshi, A. H. Abdullah, and A. Altameem, "Road aware geographical routing protocol coupled with distance, direction and traffic density metrics for urban vehicular ad hoc networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 3, pp. 1251–1270, 2017. https://doi.org/10.1007/s11277-016-3604-2.

[107] C. Wu, S. Ohzahata, and T. Kato, "Can we generate efficient routes by using only beacons ? backbone routing in vanets," in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, pp. 2929–2934, IEEE, 2013. https://doi.org/10.1109/pimrc.2013.6666648.

[108] C. Wu, S. Ohzahata, and T. Kato, "Data dissemination with dynamic backbone selection in vehicular ad hoc networks," in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2013 IEEE 78th*, pp. 1–6, IEEE, 2013. https://doi.org/10.1109/vtcfall.2013.6692152.

[109] C. Wu, S. Ohzahata, Y. Ji, and T. Kato, "How to utilize interflow network coding in vanets : A backbone-based approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 8, pp. 2223–2237, 2016. https://doi.org/10.1109/tits.2016.2516027.

[110] T. Mangel, M. Michl, O. Klemp, and H. Hartenstein, "Real-world measurements of non-line-of-sight reception quality for 5.9 ghz ieee 802.11 p at intersections," in *International Workshop on Communication Technologies for Vehicles*, pp. 189–202, Springer, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19786-4_17.

[111] R. Meireles, M. Boban, P. Steenkiste, O. Tonguz, and J. Barros, "Experimental study on the impact of vehicular obstructions in vanets," in *Vehicular Networking Conference (VNC), 2010 IEEE*, pp. 338–345, IEEE, 2010. https://doi.org/10.1109/vnc.2010.5698233.

[112] M. Boban, T. T. Vinhoza, M. Ferreira, J. Barros, and O. K. Tonguz, "Impact of vehicles as obstacles in vehicular ad hoc networks," *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 29, no. 1, pp. 15–28, 2011. https://doi.org/10.1109/JSAC.2011.110103.

[113] J. Karedal, N. Czink, A. Paier, F. Tufvesson, and A. F. Molisch, "Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 60, no. 1, pp. 323–328, 2011. https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2094632.

[114] T. Abbas, K. Sjöberg, J. Karedal, and F. Tufvesson, "A measurement based shadow fading model for vehicle-to-vehicle network simulations," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, 2015. https://doi.org/10.1155/2015/190607.

[115] A. F. Molisch, F. Tufvesson, J. Karedal, and C. F. Mecklenbrauker, "A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels," *IEEE Wireless Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 12–22, 2009. https://doi.org/10.1109/mwc.2009.5361174.

[116] C. Sommer and F. Dressler, "Using the right two-ray model ? a measurement based evaluation of phy models in vanets," in *Proc. ACM MobiCom*, pp. 1–3, 2011. https:

//pdfs.semanticscholar.org/a86f/90f1238ccb90181c26335684fd762247408e.pdf.

[117] H. Guo, S. T. Goh, N. C. Foo, Q. Zhang, and W.-C. Wong, "Performance evaluation of 802.11 p device for secure vehicular communication," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, pp. 1170–1175, IEEE, 2011. https://doi.org/10.1109/iwcmc.2011.5982706.

[118] C. GRUET, "5g overview." Telecom Evolution, Villeneuve d'Ascq, 2018.

[119] A. Abdelgader and W. Lenan, "The physical layer of the ieee 802.11 p wave communication standard : the specifications and challenges," in *Proceedings of the world congress on engineering and computer science*, vol. 2, p. 71, 2014.

[120] K. Bilstrup, E. Uhlemann, and E. G. Ström, "Medium access control in vehicular networks based on the upcoming ieee 802.11 p standard," in *15th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS), 15-20 November, 2008, Jacob K. Javits Convention Center, 36th St. & Eleventh Av. Manhattan, New York*, p. 12, World Congress on ITS, 2008. https://trid.trb.org/view.aspx?id=904224.

[121] K. Dar, M. Bakhouya, J. Gaber, M. Wack, and P. Lorenz, "Wireless communication technologies for its applications [topics in automotive networking]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 156–162, 2010. https://doi.org/10.1109/mcom.2010.5458377.

[122] R. Alieiev, A. Kwoczek, and T. Hehn, "Automotive requirements for future mobile networks," in *Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), 2015 IEEE MTT-S International Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2015. https://doi.org/10.1109/icmim.2015.7117947.

[123] T. L. Willke, P. Tientrakool, and N. F. Maxemchuk, "A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 2, pp. 3–20, 2009. https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090202.

[124] J. Chennikara-Varghese, W. Chen, O. Altintas, and S. Cai, "Survey of Routing Protocols for Inter-Vehicle Communications," in *2006 Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking Services*, pp. 1–5, July 2006. https://doi.org/10.1109/MOBIQ.2006.340432.

[125] A. Petrescu, T. Ernst, J. Huang, R. Buddenberg, and C. Perkins, "Cooperative Adaptive Cruise Control and Platooning at SDOs and Gap Analysis," Oct. 2015. https://tools.ietf.org/html/draft-petrescu-its-cacc-sdo-04.

[126] E. T. C. I. T. System, "Intelligent Transport Systems (ITS) ; STDMA recommended parameters and settings for cooperative ITS ; Access Layer Part," Technical Report ETSI TR 102 861 V1.1.1 (2012-01), 2012. http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102800_102899/102861/01.01.01_60/tr_102861v010101p.pdf.

[127] P. Sondi, L. Rivoirard, and M. Wahl, "Performance evaluation of vehicle-to-vehicle communications for a collective perception application in vehicular ad hoc networks," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 602–603, 2018.

[128] R. Chen, W.-L. Jin, and A. Regan, "Broadcasting safety information in vehicular networks : issues and approaches," *IEEE network*, vol. 24, no. 1, 2010. https://doi.org/10.1109/mnet.2010.5395779.

[129] P. Sondi, *Le Routage à Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc. (Routing with quality of service support in mobile ad hoc networks)*. PhD thesis, University of Valenciennes and Hainaut-Cambresis, France, 2010.

[130] B. Mans, "Approximation Algorithms for Multi-Point Relay Selection in Mobile Wireless Networks," Research Report RR-4925, INRIA, 2003.

[131] P. Sondi, D. Gantsou, and S. Lecomte, "Design guidelines for quality of service support in optimized link state routing-based mobile ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 1, pp. 298–323, 2013. `https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.06.001`.

[132] J. Rushby, *Formal methods and the certification of critical systems*. SRI International, Computer Science Laboratory, 1993.

[133] J. P. Bowen and M. G. Hinchey, "Ten commandments of formal methods... ten years later," *Computer*, vol. 39, no. 1, pp. 40–48, 2006.

[134] D. Jackson, "Lightweight formal methods," in *International Symposium of Formal Methods Europe*, pp. 1–1, Springer, 2001.

[135] J. Barner, *A Lightweight Formal Method for the Prediction of Non-functional System Properties*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität, Diss., 2005.

[136] G. Leduc and L. Kuty, "Spécification formelle des mécanismes de support des qualités de service dans l'internet," Hermès Science, 2001.

[137] F. Fakhfakh, M. Tounsi, and M. Mosbah, "An evaluative review of the formal verification for vanet protocols," in *2019 15th International Wireless Communications Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 1209–1214, 2019.

[138] E. Chebbi, *De la modélisation formelle à la simulation à évènements discrets : application à la conception et à l'évaluation de protocoles sûrs et sécurisés pour les communications dans les transports*. PhD thesis, 2019. Thèse de doctorat en Informatique. Université du Littoral Côte d'Opale.

[139] J.-R. Abrial and J.-R. Abrial, *The B-book : assigning programs to meanings*. Cambridge University Press, 2005.

[140] L. Gyesik, "How to formally model features of network security protocols," *International Journal of Security and Its Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 423–432, 2014.

[141] J. Diaz, D. Arroyo, and F. B. Rodriguez, "A formal methodology for integral security design and verification of network protocols," *Journal of Systems and Software*, vol. 89, pp. 87–98, 2014.

[142] A. Singh and V. Singh, "Formal Modeling of Distance Vector Routing Protocol using Event-B," *Electronic and Electric Engineering ISSN 2231-1297*, vol. 3, pp. 91–98, 2013.

[143] D. Méry and N. K. Singh, "Analysis of DSR protocol in Event-B," in *Symposium on Self-Stabilizing Systems*, pp. 401–415, Springer, 2011.

[144] M. Kamali, L. Laibinis, L. Petre, and K. Sere, "Formal development of wireless sensor–actor networks," *Science of Computer Programming*, vol. 80, pp. 25–49, 2014.

[145] A. Yacoub, C. Frydman, *et al.*, "Using DEv-PROMELA for Modelling and Verification of Software," in *Proceedings of the 2016 annual ACM Conference on SIGSIM Principles of Advanced Discrete Simulation*, pp. 245–253, ACM, 2016.

[146] B. P. Zeigler, T. G. Kim, and H. Praehofer, *Theory of Modeling and Simulation*. USA : Academic Press, Inc., 2nd ed., 2000.

[147] G. Quesnel, R. Duboz, and Éric Ramat, "The Virtual Laboratory Environment – An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, no. 4, pp. 641 – 653, 2009.

[148] N. Benaissa and D. Méry, "Cryptographic Protocols Analysis in Event B," in *Perspectives of Systems Informatics. PSI 2009*, Lecture Notes in Computer Science, vol 5947. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

[149] L. Rivoirard, M. Wahl, P. Sondi, M. Berbineau, and D. Gruyer, "Using real-world car traffic dataset in vehicular ad hoc network performance evaluation," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 7, no. 12, pp. p390–398, 2016. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071251.

[150] O. Cohin and P. Sondi, "Internet of things for smart factory," *IEEE COMSOC MMTC E-Letter*, vol. 10, september 2015.