De l'impact d'une décision locale et autonome sur les systèmes de transport intelligent à différentes échelles

Marie-Ange Lebre

▶ **To cite this version:**

Marie-Ange Lebre. De l'impact d'une décision locale et autonome sur les systèmes de transport intelligent à différentes échelles. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Lyon, 2016. Français. NNT : 2016LYSEI007 . tel-01347351v2

HAL Id: tel-01347351

https://theses.hal.science/tel-01347351v2

Submitted on 23 Mar 2017

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.

N ° d'ordre NNT : 2016LYSEI007

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

préparée au sein de

l'INSA LYON

Ecole Doctorale N°512

Informatique et Mathématiques

Spécialité de doctorat : Informatique.

Soutenue publiquement le 25/01/2016, par :

Marie-Ange Lebre

De l'impact d'une décision locale et autonome sur les systèmes de transport intelligent à différentes échelles

---

Devant le jury composé de

de La Fortelle	Arnaud,	PR,	MINES ParisTech	Rapporteur
El Moudni	Abdellah,	PR,	UTBM, Belfort-Montbéliard	Rapporteur
El Faouzi	Nour-Eddin,	PR,	ENTPE/IFSTTAR	Examinateur
Fiore	Marco,	CR,	CNR-IEIIT, Italy	Examinateur
Yalaoui	Farouk,	PR,	LOSI-UTT de Troyes	Président
Le Mouël	Frédéric,	MCF,	CITI-INRIA-INSA de Lyon	Directeur
Frenot	Stéphane,	PR,	CITI-INRIA-INSA de Lyon	Directeur
Ménard	Eric,	Directeur R&D,	VALEO Creteil, France	Invité

Thèse effectuée au sein du
laboratoire INRIA CITI - Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration de Services - de l'INSA de Lyon, France, dans l'équipe *Dynamic Software and Distributed Systems* (DynaMid), ainsi qu'au sein de l'entreprise VALEO comfort and driving assistance, études électroniques à Créteil, France

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

À la mémoire de mes grands parents

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Remerciements

Je suis particulièrement reconnaissante envers le professeur Arnaud De La Fortelle et le professeur Abdellah El Moudni de l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de cette recherche en s'engageant à être rapporteur. Je les remercie pour le temps consacré à la lecture de ce travail ainsi que pour les commentaires détaillés m'ayant permis de l'améliorer et d'approfondir mes reflexions. Je tiens à remercier le professeur Nour-Eddin El Faouzi et le Dr Marco Fiore pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Je remercie également le professeur Farouk Yalaoui pour l'honneur qu'il me fait d'être président du jury. Je saisis cette occasion pour remercier les membres d'avoir fait l'effort de lire et d'examiner cette thèse et pour le déplacement afin d'assister à la défense.

J'aimerais remercier mon encadrant de thèse, Frédéric Le Mouël pour m'avoir ouvert les portes du monde de la recherche et de m'avoir permis d'être autonome tout au long de ce travail. Merci pour son temps et ses discutions scientifiques ou personnelles qui m'ont permis d'avancer dans ma réflexion. Merci à Stéphane Frénot. Je tiens à remercier tout le laboratoire CITI pour leur accueil, leur bonne humeur et l'ambiance joyeuse et chaleureuse qu'ils y créent. Une pensée particulière à Paul et Mickaël qui m'ont remonté le moral plus d'une fois, ainsi qu'à Gaelle toujours disponible et souriante.

Je remercie également mon autre encadrant de thèse Eric Ménard qui lui m'a ouvert les portes de cette grande entreprise qu'est Valeo. Merci à lui pour son esprit critique. Je tourne ma gratitude vers son équipe spécialement : Ciprian, Fabienne, Christelle et Richard. Et je remercie particulièrement Frédéric pour sa bonne humeur inébranlable et son soutien :). Merci aussi à sa "team" des repas de midi. Merci à Pierre pour les cafés et les séries :) Je tiens à remercier Philippe Gougeon et Alexandre Garnault de m'avoir épaulée durant ma thèse et permis de participer à leur projet sans compter leur temps et leur patience à mon égard. Sans eux toute une partie de ma thèse n'aurait pas été possible. Un grand merci à Alexandre toujours disponible et encourageant jusqu'au bout dans les moindres détails.

Je remercie Roya, nous avons fini notre thèse ensemble, dernière ligne droite pour la rédaction, dernière ligne droite pour la soutenance, merci d'avoir partagé ces moments durs avec moi, merci pour les discussions, merci pour les sourires malgrè les difficultés.

Je tiens à remercier, mes amis qui font partie intégrante de ma vie, pour leur soutien mais également pour tous les moments d'évasion passés avec eux. Ils ont su me donner le réconfort et l'énergie nécessaires tout au long de ces années de thèse. Ainsi merci à Cla, Dju, Anne-Cec et Mat pour toutes ces soirées et moments passés ensemble, chez vous :). Merci à Maud et merci à Djé pour tes escapades d'escalade qui m'ont vidé l'esprit. Merci à Ritch et Léna pour tous les fous rires partagés avec une pensée particulière à nos rendez-vous pizza du Dimanche soir :). Merci à Maud, Aurélie et sa famille, Amandine et Jérôme pour votre amitié et votre présence à mes côtés qui durent depuis des années maintenant (on ne les compte plus ;). Merci à Maud pour nos mardis soirs :), à Aurélie (félicitations Doc ;) pour toutes ces sorties ski et randos :), à

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Amandine et Jérôme pour tous ces diners à l'improviste :). Une belle pensée à Flora et Lison qui m'ont montré qu'une thèse passe très vite ! Je remercie Audrey et Adeline qui m'ont hébergée au cours de mes nombreuses allées et venues entre Paris et Lyon, merci pour votre gentillesse et hospitalité. Merci à ceux qui sont loins mais toujours là. Enfin, bienvenue à Tom, je souhaite beaucoup de bonheur aux jeunes parents :)

Un très grand merci à Mathilde et Hadrien pour le temps que vous avez passé à me relire, une tâche très difficile :). Merci à Danielle et Jean-Pierre pour votre soutien ininterrompu, votre présence si chaleureuse et votre générosité.

Je dédie cette thèse à mes parents, Maguy et Jean-Pierre que j'aime profondément. Vous avez toujours cru en moi et m'avez soutenu par votre amour inconditionnel, et ce quelque soit les décisions que j'ai prises : merci du fond du coeur. Je remercie toute ma famille pour sa bienveillance sans faille et en particulier ma tante, Elisabeth, pour son amour et les bols d'air frais en Lozère. Merci à mes deux frangins, Lo et Seb, des exemples à mes yeux et que j'aime profondément, je ne peux citer Seb sans Maud, Enzo, Louis et Jules, et Laurent sans Charlène, merci pour le bonheur que vous m'apportez, merci d'être vous, tout simplement :)

Enfin, the last but not the least, je remercie Max qui m'a supportée pendant les moments les plus difficiles : merci pour ton aide, ton écoute, tes conseils, ta cuisine :), tes rires et surtout ton amour qui me donne de la force tous les jours. *Nous sommes une équipe... Je t'aime ...*

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive, je remercie tous ceux et celles qui me permettent de me sentir exister...

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Résumé

Les environnements connectés sont en plein essor, grâce aux différents supports technologiques couplés aux nouvelles technologies de l'information et de la communication. Le milieu urbain et véhiculaire ne déroge pas à la règle ; la communication entre les véhicules et l'infrastructure permet d'imaginer une quantité considérable de nouveaux services, rendant la ville toujours plus intelligente. Déployer ce genre d'application dans ce milieu hautement dynamique est actuellement une problématique ouverte, due à l'inadéquation de celle-ci aux contraintes matérielles et contextuelles de l'environnement. En effet, ces applications engrangent une quantité importante de données (rendant difficile le traitement en temps réel) due à la topologie du réseau et au nombre d'éléments connectables. Ensuite l'accès à l'information utile pour ces services est limité et perturbé par l'environnement urbain (physique, dynamique, et connecté). Ceci implique une robustesse des services déployés, face à la perte de paquet et à la mauvaise qualité du réseau. L'acceptabilité de ce nouvel environnement par les usagers et leurs comportements représente également un enjeu, tout comme la quantité d'éléments à déployer dans le réseau. Enfin les problèmes de sécurité des données et l'harmonisation des standards dans le monde sont en cours d'étude. Avant l'arrivée de la voiture autonome, la voiture connectée s'introduira dans l'internet des objets dans un futur proche. Pour pallier cette transition, nous proposons des applications ITS qui s'inscrivent dans le réseau actuel en tenant compte de ses contraintes.

Dans cette thèse nous présentons des applications véhiculaires au sein de différentes échelles : de la petite échelle qui permet d'effectuer des tests réels de communication et de service, à des échelles plus grandes incluant plus de contraintes mais permettant des simulations sur l'ensemble du réseau. Dans ce contexte, nous soulignons l'importance de traiter des données réelles, afin de pouvoir interpréter correctement les résultats des simulations. Nous proposons alors, différents services utilisant les communications V2V et V2I. Dans ces derniers, nous ne prétendons pas prendre le contrôle du véhicule (le conducteur garde le contrôle), notre but est de montrer le potentiel de la communication grâce à des services tenant compte des difficultés énoncées précédemment. À petite échelle, nous nous focalisons sur un service comprenant un feu de circulation, permettant d'améliorer les temps de parcours et d'attente, ainsi que la consommation en CO2 et en carburant. La moyenne échelle se situant sur un rond-point, permet, grâce à un algorithme décentralisé, d'améliorer ces mêmes paramètres et montre également qu'avec une prise de décision simple et décentralisée, le système est robuste face à la perte de paquet, à la densité, aux comportements humains ou encore aux taux d'équipement. Enfin, à l'échelle d'une ville, nous montrons que des décisions prises de manière locale et décentralisée, avec un accès à une information partielle dans le réseau, nous obtenons des résultats proches des solutions centralisées. Ainsi la quantité de données transitant dans le réseau est considérablement diminuée. Nous testons également la réponse de ces modèles en cas de perturbation plus ou moins importante, tels que un accident, un acte terroriste ou encore une catastrophe naturelle. Les modèles permettant une prise de décision locale grâce aux informations délivrées autour d'un véhicule, montrent leur potentiel, que se soit avec la communication V2I ou V2V.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Abstract

Connected environments are flourishing thanks to the different technological media coupled with new information and communications technology. Urban environments are no exception to the rule, communication between vehicles and infrastructure allows us to imagine a considerable amount of new services making the city more intelligent. Deploying such applications in this highly dynamic environment is currently an open issue, because of the inadequacy of the latter to the material and contextual constraints of the environment. Indeed, these applications represent a significant amount of data due to the network topology and the number of connected elements and their treatment in real time is difficult. Then access to useful information for those services is limited and disturbed by the urban environment (physical, dynamic and connected). This also means that the deployed services have to be robust to packet loss or channel quality. Finally the acceptability of this new technology by users and their behaviors, are a challenge, as the number of devices to be deployed in the city. Finally, data security issues and harmonization of standards in the world are being studied. Before the arrival of the autonomous car, the connected car will take an important place in the Internet of Things in the near future. To overcome this transition, we offer ITS services in the urban network with its current constraints.

In this thesis we present vehicular applications across different scales : from small scale that allows real tests of communication and services ; to larger scales that include more constraints but allowing simulations on the entire network. In this context, we highlight the importance of real data and real urban topology in order to properly interpret the results of simulations. We describe different services using V2V and V2I communication. In each of them we do not pretend to take control of the vehicle, the driver is present in his vehicle, our goal is to show the potential of communication through services taking into account the difficulties outlined above. In the small scale, we focus on a service with a traffic light that improves travel times, waiting times and CO2 and fuel consumption. The medium scale is a roundabout, it allows, through a decentralized algorithm, to improve the same parameters. It also shows that with a simple and decentralized decision-making process, the system is robust to packet loss, density, human behavior or equipment rate. Finally on the scale of a city, we show that local and decentralized decisions, with only a partial access to information in the network, lead to results close to centralized solutions. The amount of data in the network is greatly reduced. We also test the response of these systems in case of significant disruption in the network such as accidents, terrorist attack or natural disaster. Models, allowing local decision thanks to information delivered around the vehicle, show their potential whatsoever with the V2I communication or V2V.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des matières

1 Introduction **15**
1.1 Les VANETs (Vehicular Ad-hoc Network) . . . 15
1.1.1 Définition et contexte . . . 15
1.1.2 Défis et enjeux . . . 17
1.2 Problématique . . . 20
1.3 Contribution . . . 21
1.4 Plan de la thèse . . . 22

2 Contexte **24**
2.1 Une évolution sociétale . . . 24
2.1.1 Complexité des applications VANETs . . . 26
2.1.2 Vers un véhicule intelligent . . . 27
2.1.3 Vers un environnement urbain intelligent : les ITS . . . 38
2.1.4 Classification et discussion . . . 48

3 Méthodologie : de la petite échelle à la grande échelle ; du réel à la simulation. **51**
3.1 Petite échelle . . . 52
3.1.1 Deux véhicules sur l'autoroute A41 . . . 52
3.1.2 Interopérabilité avec FOTsis . . . 57
3.1.3 Un véhicule et un feu de circulation . . . 61
3.2 Moyenne échelle . . . 65
3.2.1 Le rond point d'Europarc à Créteil . . . 65
3.3 Large échelle . . . 77
3.3.1 Trace de la ville de Cologne . . . 78
3.4 Conclusion . . . 79

4 Prise de décision locale d'un véhicule à un feu de circulation : impact local **81**
4.1 État de l'art . . . 81
4.2 GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory system) . . . 83
4.3 Scénarios simulés . . . 84
4.3.1 Circuit . . . 84
4.3.2 Grille de Manhattan . . . 85
4.3.3 Trajet des navettes Valeo à Bobigny . . . 86
4.4 Conclusion . . . 89

5 Prise de décision locale de n véhicules dans un rond-point : impact local **90**
5.1 État de l'art . . . 90
5.2 Modèle V2V de fluidification . . . 91
5.2.1 Détecter et résoudre un conflit . . . 91
5.2.2 Règles de priorité . . . 93
5.2.3 Contraintes . . . 94
5.3 Simulations et résultats . . . 95

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

5.3.1 Environnement et hypothèse . . . 95
5.3.2 Impact de notre modèle . . . 95
5.3.3 Comparaison avec deux autres modèles . . . 98
5.3.4 Sensibilité : comportement humain . . . 100
5.3.5 Sensibilité : taux d'équipement . . . 101
5.3.6 Sensibilité : densité . . . 102
5.3.7 Sensibilité : perte de paquets . . . 102
5.3.8 Sensibilité : rayon de communication . . . 104
5.4 Conclusion . . . 105

6 Prise de décision locale à des intersections autonomes : impact sur la ville 106
6.1 État de l'art . . . 107
6.2 Prérequis . . . 108
6.2.1 Modélisation du réseau . . . 108
6.2.2 L'application *Smooth Way* . . . 109
6.3 Modèles décentralisés avec information locale ou partielle du réseau . . . 110
6.4 Simulations et résultats . . . 113
6.4.1 Environnement et hypothèse . . . 113
6.4.2 Nombre d'intersections à équiper. . . . 114
6.4.3 Valeur de r dans *Smooth Way*. . . . 114
6.4.4 PDLAIS versus PCCIS. . . . 115
6.4.5 Stabilité de la valeur r dans PDLAIS. . . . 116
6.4.6 Perte de paquet sur PDLAIS. . . . 117
6.5 Conclusion . . . 118

7 Prise de décision avec de l'information partielle en V2V : impact sur la ville 120
7.1 État de l'art . . . 121
7.2 Prérequis . . . 122
7.3 Modèle de crowdsourcing véhiculaire . . . 124
7.3.1 Phéromone sur k-Parcours : *PKP* . . . 124
7.3.2 K-Phéromone Parcours : *KPP* . . . 125
7.3.3 Exploration des Parcours de Phéromone : *PPE* . . . 125
7.4 Simulations et résultats . . . 126
7.4.1 Environnement . . . 126
7.4.2 Impact de nos modèles . . . 128
7.4.3 Investigation de l'impact d'incidents urbains . . . 130
7.5 Conclusion . . . 135

8 Conclusions et travaux futurs 136
8.1 Résumé et perspectives techniques à court et moyen termes . . . 136
8.2 Élargissement scientifique à long terme . . . 139

Bibliographie 143

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des figures

2.1 Évolution des applications véhiculaires . . . 25
2.2 Briques composants les applications véhiculaires . . . 26
2.3 Tendances des applications véhiculaires . . . 27
2.4 Minimiser la congestion (Honda) . . . 28
2.5 Affichage tête haute première génération (BMW) . . . 29
2.6 Affichage tête haute, future génération (BMW) . . . 29
2.7 Localisation en réalité augmentée (LRA) . . . 30
2.8 Système de navigation de Siemens et l'université de Linz . . . 30
2.9 Application sur smartphone : iOnRoad . . . 31
2.10 Projet ABV . . . 32
2.11 Projet Magnétique (Volvo) . . . 32
2.12 Toyota Friend . . . 34
2.13 Alcatel-Lucent and Toyota : LTE connected car . . . 34
2.14 Applications imaginées par des étudiants pour General Motor . . . 37
2.15 Projet SARTRE . . . 39
2.16 Le projet SmartWay et ses partenaires . . . 41
2.17 Équipement du projet SimTD . . . 43
2.18 Applications du projet SimTD . . . 43
2.19 Applications imaginées par Audi et GEELab : la ville est un réseau . . . 47
2.20 Classement des applications selon leur complexité . . . 48

3.1 Essais sur l'autoroute A41 entre les échangeurs de Crolles et de Touvet (38) . . . 53
3.2 Système des essais en entier . . . 54
3.3 Neige sur les antennes . . . 55
3.4 Autoroute M-12 en Espagne . . . 58
3.5 Vue zoomée sur le site de test de l'autoroute M-12 . . . 58
3.6 Parcours du véhicule . . . 59
3.7 Architecture de la communication pour l'interopérabilité des tests . . . 59
3.8 Application Co-Drive qui affiche les messages d'alertes DENM . . . 61
3.9 Circuit du CERAM avec emplacement des feux de circulation . . . 62
3.10 Équipement du feu de circulation . . . 63
3.11 "Human Machine Interface" . . . 63
3.12 Carte du circuit du CERAM avec emplacement des feux de circulation dans SUMO 64
3.13 Vitesse (km/h) en fonction du temps (s) : test réel (a) test simulé (b) // Emissions de CO2 cumulées (g) en fonction de la distance parcourue (m) : test réel (c) test simulé (d) . . . 65
3.14 Le rond point d'Europarc Créteil dans SUMO . . . 68
3.15 Statuts des véhicules durant 45 minutes . . . 69
3.16 Vitesse moyenne et temps de parcours moyen des véhicules durant 45 minutes . . 69
3.17 (a) Exemple d'erreurs de topologie, (b) exemple d'erreurs de trafic véhiculaire . . 70
3.18 Vitesse moyenne et temps de parcours moyen des véhicules . . . 72

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

3.19 Statuts des véhicules durant 45 minutes . . . 72
3.20 Taux d'occupation le matin et le soir sur les liens entrants . . . 73
3.21 Taux d'occupation le matin et le soir sur les liens sortants . . . 74
3.22 Taux d'occupation sur les liens entrants avec des flux de trafic différents . . . 75
3.23 Taux d'occupation sur les liens sortants avec des flux de trafic différents . . . 75
3.24 Temps de parcours et temps d'attente moyens avec des flux de trafic différents . 76
3.25 Distribution des intervalles d'arrivées des véhicules . . . 76
3.26 Temps de parcours et temps d'attente moyens avec des programmes différents de feux de circulation . . . 77
3.27 Ville de Cologne dans le simulateur SUMO . . . 79

4.1 Résultats pour un scénario simple avec trafic . . . 84
4.2 Grille de Manhattan . . . 85
4.3 Résultats sur la grille de Manhattan . . . 86
4.4 Trajet des navettes dans le quartier de Bobigny . . . 86
4.5 Paramètres de simulation avec différentes densités véhiculaires : faible (L : Low), moyenne (M : Medium) et forte (H : High) . . . 87
4.6 Résultats sur le quartier de Bobigny . . . 87
4.7 Taux d'équipement pour obtenir une réduction maximale dans les trois catégories (pour tous les véhicules) . . . 88
4.8 Taux d'équipement (véhicules et infrastructure) pour obtenir une réduction maximale dans les trois catégories (pour les navettes). . . . 89

5.1 Liens entrants et sortants du rond-point . . . 91
5.2 Exemple de conflits . . . 93
5.3 Exemple d'application de la priorité . . . 93
5.4 Taux d'occupation des liens entrants et sortants du rond-point . . . 95
5.5 Moyennes en temps de parcours et d'attente . . . 96
5.6 Histogrammes des temps de parcours et des temps d'attente . . . 97
5.7 Émissions de CO2 et consommation de carburant cumulés . . . 97
5.8 Profils des vitesses des liens entrants en m/s . . . 98
5.9 Comparaison avec un modèle centralisé (réservation) et décentralisé (négociation) 99
5.10 Quantité de données cumulées et complexité des modèles . . . 99
5.11 Moyenne du temps de parcours et d'attente en fonction des différents comportements humains . . . 100
5.12 Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents profils d'accélération et décélération . . . 101
5.13 Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents taux d'équipement . . . 101
5.14 Moyenne du temps de parcours et d'attente en fonction des différentes densités . 102
5.15 Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents taux de perte de paquet avec : (A) un trafic normal, (B) un fort trafic . . . 103
5.16 Relation entre la perte de paquet et le calcul de conflits . . . 103
5.17 Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents rayons de communication avec : (A) un trafic normal, (B) un trafic fort. . . . 104

6.1 Gain en temps de parcours, en consommation de carburant et en temps d'attente selon $r \in [0, 1]$ dans *Smooth Way* et le taux d'équipement des intersections. . . . 115
6.2 Comparaison de PDLAIS et PCCIS . . . 116
6.3 Différentes distributions de r avec PDLAIS . . . 117
6.4 Impact de la perte de paquet selon la distance du véhicule par rapport à l'intersection . . . 118

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

7.1 Concept du modèle de crowdsourcing véhiculaire 124
7.2 Calibration des *paramètres des phéromones* 127
7.3 Quartier de Cologne utilisé pour la simulation 129
7.4 Localisation de l'accident sur le quartier de Cologne 131
7.5 Localisation de l'acte terroriste. 132

8.1 Modèle multi-niveau possédant différentes mobilités 140

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste des tableaux

1 Liste des acronymes . . . 13
2 Liste des acronymes . . . 14

1.1 Plan de la thèse . . . 22

3.1 Matériel utilisé . . . 54
3.2 Résultats du deuxième essai. . . . 55
3.3 Résultats du troisième essai . . . 55
3.4 Similarité entre les données réelles et les données synthétiques . . . 71

5.1 Temps passé dans le rond-point, temps passé pour la traversée selon les différents modèles . . . 99
5.2 Profils : accélération/décélération . . . 100

6.1 Paramètres des simulations . . . 113
6.2 Ecart type en consommation et en temps de parcours et d'attente pour $r = 0.1$ et $r = 0.5$ . . . 116

7.1 Paramètres des phéromones . . . 128
7.2 Résultats sur la carte de Manhattan . . . 129
7.3 Resultats sur la carte de Cologne . . . 130
7.4 Résultats sur la carte de Cologne en cas d'accident . . . 131
7.5 Résultats sur la carte de Cologne en cas d'acte terroriste . . . 133
7.6 Résultats en temps de parcours du véhicule d'urgence (si il arrive à destination) sur la carte de Cologne en cas de tremblement de terre . . . 134

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste des acronymes

ITS	Intelligent Transport System
NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
VANET	Vehicular Ad hoc NETwork
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
V2V	Vehicle To Vehicle
V2I	Vehicle To Infrastructure
V2U	Vehicle To Users
V2RL	Vehicle To Real
V2X	Vehicle To all
DSRC	Dedicated Short Range Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ERTICO	European Road Transport Telematics Implementation COordination
FCC	Federal Communications Commission
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
CCFA	Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
C2CC	Car To Car Communication Consortium
VII	Vehicle Infrastructure Integration
CEN	Comité Européen de Normalisation
NILIM	National Institute for Land and Infrastructure Management
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
LIDAR	Light Detection And Ranging
CES	Consumer Electronics Show
FOT	Field Operational Test
SMIC	Salaire Minimum de Croissance

Table 1 – Liste des acronymes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

HMI	Human Machine Interface
ETC	Electronic Toll Collection
API	Application Programming Interface
HUD	Head Up Display
GLOSA	Green Light Optimal Speed Advisory system
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
IOT	Internet Of Things
VICS	Vehicle Information And Communication System
ACC	Adaptive Cruise Control
IRS	Intelligent Roadside Stations
RSU	Road Side Unit
OBU	On Board Unit
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
CAM	Cooperative Awareness Message
SPAT	Signal Phase And Timing Message
CODM	Co-Drive Message
UMTS	Universal Mobile Telecommunicatios System
MK1	MimoKit 1
MK2	MimoKit 2
RAN	Radio Access Network
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TraCI	Traffic Control Interface
PMV	Panneau à Message Variable
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
ACO	Ant Colony Optimization
SPP	Shortest Path Problem
JMA	Japan Meteorological Agency

TABLE 2 – Liste des acronymes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 1

Introduction

1.1 Les VANETs (Vehicular Ad-hoc Network) 15
1.1.1 Définition et contexte 15
1.1.2 Défis et enjeux 17
1.2 Problématique 20
1.3 Contribution 21
1.4 Plan de la thèse 22

Le chapitre suivant expose les principes et les défis liés à l'essor des systèmes de transports intelligents (ITS) et plus particulièrement celui du véhicule. L'alliance entre l'évolution technologique et l'industrie automobile nous permet de mettre en évidence les défis apparus et ceux à venir sur le transport véhiculaire intelligent. La section 1.1 dessine les contours d'un environnement urbain véhiculaire contraignant et donne les directions de recherche et d'industrie engagées dans ce domaine. Elle décrit également le besoin d'une structuration répondant à des défis technologiques, sociétaux mais aussi gouvernementaux. En section 1.2 nous formulons notre problématique autour de la transition entre le véhicule d'aujourd'hui et le véhicule autonome du futur. Pour cela, nous nous focaliserons sur le problème de la fluidification et de l'optimisation du trafic du réseau, à différentes échelles. Nous proposerons des applications ayant de bonnes propriétés malgré des contraintes liées au réseau véhiculaire actuel (manque d'information, dynamisme du réseau, taux d'équipement, réaction du conducteur, événement imprévisible). Ainsi, les points clés de contribution sont présentés dans les sections 1.3 et 1.4. Dans cette dernière, nous listons et nous détaillons le contenu des différents chapitres.

1.1 Les VANETs (Vehicular Ad-hoc Network)

1.1.1 Définition et contexte

Le XXIème siècle est le théâtre d'une importante évolution dans le domaine des communications sans fil. Ces progrès technologiques correspondent aux besoins actuels des usagers d'accéder à leurs données n'importe où et à n'importe quel moment. Les objets connectés ont

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

considérablement amélioré notre quotidien. En effet ces derniers sont présents dans nos maisons, au travail, en ville et maintenant dans les transports et nos voitures. Aujourd'hui, le défi est d'équiper nos infrastructures pour rendre la route plus sûre (diffusion d'informations : info trafic, accidents, dangers, déviations, météo), améliorer le trajet des voyageurs (ergonomie des transports, usage de différent type de transport sur un trajet, covoiturage) et améliorer leur confort (internet, jeux, chat, assistance).

Parmi les ITS, nous nous intéressons au véhicule particulier. Les VANETs sont un groupe de véhicules, voyageant dans le réseau urbain, capable d'interagir avec les autres véhicules ou l'infrastructure à portée de communication. Ainsi, aucun dispositif physique fixe n'est requis. Les VANETs diffèrent des MANETs (Mobile Ad-Hoc Network) de par leurs noeuds qui sont des véhicules, se déplaçant dans un environnement urbain restreint, avec des contraintes (feux de circulation, vitesses limitées, stops, rues en sens uniques, rond-points). Cependant, contrairement aux MANETs ces noeuds ne se déplacent pas au hasard et sont organisés selon un trajet déterminé à l'avance. De plus les VANETs n'ont pas de problème de mémoire, de puissance de calcul (la capacité de traitement est très grande) ni d'énergie (les éléments du réseau urbain ne sont pas limités) grâce à la capacité des noeuds.

Le but des VANETs est de développer un système de communication véhiculaire capable de distribuer rapidement des données avec efficacité. Des technologies permettant de communiquer dans des conditions hautement dynamiques sont donc requises. Ce nouveau moyen de communication dans le réseau urbain est récemment devenu très populaire dans le domaine de la recherche en télécommunication. Il attire l'attention des gouvernements, des universités et des industries. La communication véhiculaire concerne autant l'aspect sécurité que l'aspect divertissement. Les VANETs requièrent donc, dans leurs standards un besoin d'interfaces multiples capables d'opérer en même temps avec une haute qualité de service. Ils doivent également supporter la nature des applications véhiculaires (diffusion fiable d'information) dans un environnement très complexe (bâtiments, vitesse des véhicules élevée, par exemple).

Ainsi, le développement de technologies sans fil comportant de nouvelles architectures adaptées au contexte urbain, suscite, ces dernières années, un réel intérêt. Par nécessité, des communications dédiées à de courte portée (DSRC, Dedicated Short Range Communication) ont vu le jour spécialement pour les ITS. DSRC désigne ainsi tous les protocoles et les normes dédiés à ce domaine. Parmi ces derniers, l'Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) travaille sur un nouvel amendement du standard IEEE 802.11 pour y ajouter un accès aux environnements véhiculaires. Cette nouvelle catégorie de standard se nomme WAVE : Wireless Access in Vehicular Environment. Il définit ainsi toutes les améliorations apportées à la base 802.11 pour supporter les applications dans le domaine des ITS. Ce nouvel amendement est intitulé 802.11p. Le délai prévu pour les messages de haute priorité mettant en jeu la sécurité des usagers de la route, est de 10 millisecondes. Techniquement, en octobre 1999, la Commission Fédérale des Communications (FCC) a alloué aux USA un spectre électromagnétique dans la bande 5.9GHz. En août 2008, l'Europe en a fait de même. Cette bande est exclusivement réservée aux applications véhiculaires, à la communication entre véhicules (V2V) et à la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

communication avec l'infrastructure (V2I).

La bande allouée autour de 5.9Ghz est commune aux pays voulant développer le véhicule intelligent (USA, Europe, Japon), en revanche, les standards varient selon les lieux. Ce problème d'harmonisation est un obstacle majeur aux déploiements des VANETs. L'industrie automobile étant mondialisée, des accords entre les pays sont nécessaires. Le support du gouvernement est également important. Aux USA l'accord entre les industries et le gouvernement (plus particulièrement la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration)) se met en place progressivement pour autoriser le déploiement de cette technologie sur les réseaux urbains américains. En Europe, cette entente n'est pas clairement établie ; une séparation entre l'industrie et le gouvernement est présente sur ce sujet. En revanche, des efforts de communication et de projet commun existent. De plus, l'hétérogénéité des états d'Europe rend le problème complexe (lois liées à la sécurité sur le milieu urbain).

Cette nouvelle communication entre les voitures et l'infrastructure permet d'imaginer beaucoup d'applications différentes pouvant se focaliser sur, un véhicule et/ou un conducteur, un groupe de véhicules et/ou un groupe de conducteurs, l'infrastructure ou encore une ville entière.

1.1.2 Défis et enjeux

Dans ce contexte urbain connecté, le véhicule ne fait plus simplement office de moyen de transport mais est considéré comme un prolongement de la connectivité ambiante de notre société, comme le smartphone actuellement. Cependant, les enjeux et les défis sont différents du mobile car l'environnement urbain est extrêmement complexe et dynamique.
Voici un aperçu de ces défis à venir dans le domaine des VANETs :

1. *La quantité de données.*
   Le parc automobile français au premier janvier 2014 (particuliers, utilitaires, autobus, camions) est de 38 200 000 véhicules selon le CCFA. Si tous ces véhicules communiquent, cela laisse imaginer la quantité de données pouvant circuler sur le réseau urbain. Une demande croissante de données sans fil va apparaître impliquant une saturation de la bande et des pertes de paquet. Sachant que beaucoup de services pensés pour les VANETs sont de type sécuritaire (éviter une collision, garder les distances de sécurité, par exemple) ce problème peut avoir des conséquences désastreuses. Enfin, la topologie du réseau change fréquemment dans un milieu urbain, ainsi les applications développées autour de l'information trafic dans les VANETs exigent une mise à jour régulière, et donc une quantité de données considérable.
2. *L'accès et la diffusion de l'information.*
   Dans un réseau de communication, il existe deux types de diffusion de l'information : centralisé et décentralisé. Dans un système centralisé, des caméras et des capteurs implantés sur la route et les voitures, collectent les informations du réseau et les transmettent à une unité centrale (info trafic, accidents, travaux, densité véhiculaire). Ainsi les véhicules reliés à ce système ont un accès à une information totale du réseau. Cependant les systèmes centralisés ont un coût de déploiement assez important et un système de maintenance

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

périodique. Ils impliquent également un temps de traitement non négligeable dû à la quantité de données importante, or, le réseau véhiculaire étant très dynamique (les délais de transmission pouvant être vitaux) une réponse en temps réel (de l'ordre de la milliseconde) est primordiale et difficile à optimiser. Dans les systèmes décentralisés, chaque véhicule collecte ses propres informations sans l'appuie d'une infrastructure fixe pour le relayage des données et des messages. Ce genre de système demande un taux de déploiement important au sein même des véhicules pour le fonctionnement des services. En revanche, les systèmes décentralisés répondent mieux à la dynamique du réseau véhiculaire et au besoin d'accès à l'information en temps réel. Cependant, dans la réalité cet accès est souvent partiel et incomplet.

3. *La sécurité des données.*
   Comme énoncé précédemment, les informations transmises par des applications liées à la sécurité routière, peuvent entraîner des changements de comportement chez les usagers et engendrer des situations catastrophiques telles que des accidents de la route. Un véhicule connecté est ouvert à l'extérieur, ainsi toutes ses applications nécessitent des communications sécurisées. De plus le véhicule transportera, à l'instar du smartphone, une quantité de données personnelles considérablement sensibles. Le défi majeur est donc de protéger le réseau des intrus et d'assurer l'anonymat des données.

4. *L'environnement urbain.*
   Les constructions urbaines, l'infrastructure (péages, parking, panneaux) ou encore les conditions climatiques peuvent entraîner la réflexion des ondes, des pertes de paquet et des perturbations dans les canaux de communication. Comme nous l'avons vu, dans un réseau véhiculaire le délai de transmission des messages doit être court, or la vitesse des véhicules pouvant être élevée (sur autoroute) une transmission sûre devient complexe. Le réseau VANET doit donc être robuste et flexible.

5. *L'environnement connecté.*
   L'internet des objets dans les villes ainsi que dans la vie quotidienne est en pleine expansion. Ce phénomène produit un environnement intelligent. Par évolution, le milieu urbain va donc compter de plus en plus d'objets connectés capables d'échanger des données. Le véhicule va s'inscrire naturellement dans ce concept, ainsi la notion d'interopérabilité est essentielle. Ces changements vont certainement nous amener à résoudre des problèmes liés à la saturation des bandes passantes et de pertes de donnée, par exemple.

6. *Harmonisation.*
   Les éléments de base (couche PHY et MAC) sont identiques aux USA, en Europe et au Japon, même si leurs allocations de bandes sont différentes. Cependant la standardisation reste un défi majeur. Plusieurs organisations et groupes de standardisation ont vu le jour comme le « Car-to-Car Communication Consortium » (C2CC) en Europe et IntelliDrive aux USA. Ces consortiums ont une volonté d'harmoniser les standards développés chez chacun, de se coordonner et de consolider leur recherche afin de permettre un déploiement à échelle mondiale. Pour ce faire, les industries, les gouvernements et les instances de standardisation doivent communiquer pour faciliter l'arrivée de la voiture intelligente sur le marché. Notons également que le coût du déploiement d'un tel système (notamment

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

pour le V2I, où le véhicule a la possibilité d'échanger avec l'infrastructure) est un problème supplémentaire. De surcroît, en France, l'article 8 de la convention de Vienne ne permet pas la circulation sur route ouverte des véhicules autonomes.

7. *L'acceptation de l'utilisateur*
   L'acceptabilité d'un produit renvoie à une combinaison entre « acceptabilité sociale » et « acceptabilité pratique ». L'acceptabilité sociale renvoie au fait de se demander si l'utilisation d'une technologie respecte ou non les normes sociales. L'acceptabilité pratique renvoie au coût du produit, sa fiabilité et la notion de "usefulness" (utilité et simplicité d'usage) [16]. Ainsi cette interrogation sur l'acceptabilité par les usagers est légitime au sein des VANETs et soulève diverses questions qu'elles soient juridiques (responsabilité en cas d'accident, position des organismes d'assurance, place du permis de conduire), techniques (piratage de grande envergure), éthiques (réaction à des situations exceptionnelles faisant appel à l'instinct humain), psychologiques (confiance dans les aptitudes de la machine) et philosophiques (abolition d'une liberté individuelle au nom de l'intérêt général).

Les défis sont nombreux mais les enjeux de ces systèmes de communication sont conséquents, que se soit au niveau du réseau routier en lui même ou à l'échelle de la société.

1. *Réduction de la consommation.*
   Cet enjeu est principalement individuel (économies au conducteur) mais également collectif (environnemental). La consommation moyenne des véhicules liée aux progrès techniques, a considérablement diminué ces dernières années
2. *Réduction de la pollution.*
   Les constructeurs automobiles présents sur le marché européen sont soumis à des objectifs contraignants en matière d'émissions de CO2. Le transport routier représente à lui seul 90 % des émissions de gaz à effet de serre du domaine des transports (selon le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie). Réduire l'impact du secteur sur les changements climatiques est un enjeu majeur, il faut donc en priorité encourager des mobilités plus respectueuses de l'environnement.
3. *Réduction du trafic.*
   Aujourd'hui, la voiture ne fait plus gagner autant de temps. Depuis plusieurs décennies, le nombre et l'ampleur des embouteillages sont en augmentation, notamment dans les pays en voie de développement (selon l'INSEE). La principale cause provient de l'augmentation de la population et du taux d'équipement automobile. De plus, le mauvais état de certaines infrastructures et le manque d'information des usagers dans le milieu urbain favorisent également les mauvaises conditions de circulation.
4. *Sécurité routière.*
   La sécurité routière en France correspond à un enjeu majeur de santé publique et de protection des personnes. Elle passe par le recours à différentes techniques telles que la mise en place de ralentisseur, la réduction de la largeur des voies, l'introduction de chicane, la mise en place de giratoire, la gestion d'intersection par la seule règle de priorité (ce

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

qui incite à la prudence) et les zones limitées à faible vitesse. La circulation de transit est également déviée par des rocades ou ceintures périphériques. De plus la prévention et l'installation de ces infrastructures représentent un coût. Cependant, malgré ces solutions en faveur de la sécurité routière, le nombre de tués reste problématique. De nouvelles alternatives comme les ITS peuvent apporter de nouvelles perspectives dans ce domaine.

5. *Connexion des usagers.*
   La multiplicité et la rapidité des connexions Internet, avec d'une part la généralisation de l'Internet haut débit au domicile, et d'autre part la démocratisation des smartphones et des tablettes, est un environnement favorable à l'éclosion d'un monde ultra-connecté. L'usager a besoin de connaissances et de communication instantanée pour avoir accès à l'information en temps réel : connaître les délais des transports en commun, suivre les itinéraires des colis, savoir où se trouvent les enfants, maîtriser les déplacements avec un GPS ou consulter ses mails par exemple. De nouveaux usages apparaissent, favorisés par des infrastructures communicantes se mettant en place. L'environnement urbain ne fait pas exception, bien au contraire. Les usagers ont besoin d'être connectés continuellement, tout en se déplaçant. Aujourd'hui le véhicule est beaucoup assimilé à une perte de temps, mais par une connexion ininterrompue avec l'environnement, la vie des usagers se verrait facilitée.

6. *Potentiel communicatif.*
   Dans un réseau véhiculaire connecté, le véhicule est représenté comme un noeud d'un réseau sans fil : il peut donc porter n'importe quelles données ou messages d'un endroit à un autre tout en étant lui même mobile. Les quantités de données pouvant être agrégées sur le trafic urbain, les conducteurs, et l'environnement représentent un enjeu majeur pour la compréhension de la mobilité, et l'apport de service et d'application dans une ville de plus en plus connectée. Les voitures peuvent devenir des "data Mules" capable de transporter de forts volumes d'information (i.e. large backups) ayant un potentiel d'exploitation très large et important (allant des données trafics aux préférences personnelles des usagers de la route).

Dans un futur proche, le véhicule ne se définira plus seulement par sa liaison au sol ou à sa mécanique, mais par sa capacité à accéder aux informations et de les traiter de manière pertinente. Les systèmes ITS ouvrent ainsi des possibilités de services immenses qui permettront de répondre à ces enjeux d'actualité.

1.2 Problématique

Comme nous le verrons dans le chapitre 2, les applications et les services actuellement sur le marché dans le cadre des ITS, sont :

- soit implémentés dans des véhicules non communicants permettant de capter l'environnement qui les entourent directement (couleur du feu, changement de voie, distance de sécurité, par exemple), ainsi la prise de décision du conducteur est locale, directement liée à ce que le véhicule visualise, sans passer donc par un quelconque système centralisé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

- soit implémentés dans des véhicules communicants à un système centralisé, permettant au conducteur d'agir de manière individuelle en fonction d'une connaissance globale du réseau.

Quant aux applications et services pensés pour le futur des ITS, les véhicules sont complètement autonomes :

- soit en captant de manière intelligente leur environnement, le véhicule agit localement directement par rapport à ce qu'il voit : mimétisme du conducteur.
- soit en agissant comme un agent collectant ses propres données et en échangeant avec les autres agents afin de prendre une décision de manière individuelle ou collective (modèles multi-agents) .

Ainsi le décalage est important entre le présent et le futur, entre la voiture ne fournissant que des informations locales sur son environnement au conducteur et la voiture complètement autonome sans intervention du conducteur. Des systèmes directement applicables dans la réalité sur le véhicule connecté ayant un faible coût de déploiement et permettant la transition entre les deux sont donc indispensables avec les contraintes actuelles que cela implique (manque d'information du à l'environnement, dynamisme du réseau, taux d'équipement, réaction du conducteur, événement imprévisible dans le réseau).

1.3 Contribution

Ainsi, à travers cette thèse sur des services et des applications pensés dans le contexte des ITS (communication V2V et V2I) permettant d'améliorer les conditions actuelles du trafic routier, nous proposons des modèles hybrides, entre le système centralisé et décentralisé, permettant une transition entre le véhicule communicant d'aujourd'hui et celui du futur complètement autonome. Nous montrerons que des prises de décision locales, avec un accès à de l'information partielle sur le réseau, peuvent améliorer de manière significative des critères globaux liés spécifiquement au véhicule ou à l'ensemble des véhicules (temps de trajet, consommation, temps d'attente) ou liés à la robustesse du réseau (perte de paquet, rayon de communication, délai, événement imprévu dans le réseau).

Dès lors, nous nous focaliserons d'avantage sur des systèmes de diffusion d'information de type décentralisé tout en considérant les différents niveaux d'accès possible à l'information (local, partiel). J'étudierai l'impact d'un accès limité à l'information sur les performances véhiculaires et les performances du réseau. J'effectuerai également, une comparaison avec les situations idéales où le système est centralisé, avec un accès total à l'information. Nous testerons des services allant de la petite échelle (un véhicule) à la grande échelle (une ville) en passant par la moyenne échelle (un rond-point).

A petite échelle, nous proposerons un algorithme de prise de décision avec une information locale permettant une recommandation de vitesse au niveau d'un feu de circulation pour éviter l'arrêt, en condition réelle puis en simulation. A moyenne échelle, sur un rond point, nous présenterons à partir de données réelles collectées sur le terrain, un algorithme décentralisé avec

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

	Chap 4 ↓	Chap 5 ↓	Chap 6 ↓	Chap 7 ↓
Quoi	Prise de décision locale			
Où Chap 3 →	Un feu Petite échelle	Un Rond-Point Moyenne échelle	Une ville Grande échelle	
Comment	V2I	V2V	V2I	V2V
Outils :	-Information locale	-Information locale	-Information locale partielle	-Information partielle
Résultats : Critères	- Optimisation véhiculaire	- Optimisation véhiculaire - Robustesse	- Optimisation véhiculaire - Robustesse	- Optimisation véhiculaire - Robustesse - Dynamisme

TABLE 1.1 – Plan de la thèse

prise de décision locale et individuelle entre les véhicules abordant le rond point pour s'insérer de manière fluide et traverser ce dernier de manière efficace. Enfin, à l'échelle d'une ville, j'utiliserai les données disponibles sur la ville de Cologne pour présenter un algorithme semi-décentralisé de prise de décision locale des véhicules aux niveaux d'intersections communicantes sélectionnées dans la ville pour améliorer la fluidité et la consommation. Les cas où les intersections communiquent entre elles et le cas où elles sont indépendantes seront abordés (information locale ou information partielle du réseau). Enfin un algorithme bio-inspiré décentralisé où les véhicules échangent des informations collectées sur leur parcours à la manière de fourmis sera tester sur la fluidification du trafic mais aussi sur sa robustesse en cas d'événements dynamiques et imprévisibles telle qu'une catastrophe naturelle ou des actes terroristes.

Voici donc un aperçu global de notre apport sous forme de tableau 1.3, avec le moyen de communication (soit entre véhicules V2V, soit avec l'infrastructure V2I), l'accès à l'information (locale, partielle, globale) et les critères étudiés à chaque scénario. Les critères véhiculaires correspondent au temps de trajet, à la consommation ou encore au temps d'attente. La robustesse correspond à la réaction du système en cas de perte de paquet ou de rayon de communication différent par exemple. Enfin, la dynamique sera testée à travers des événements imprévisibles allant d'un accident, à des catastrophes naturelles en passant par des actes terroristes .

1.4 Plan de la thèse

Dans ce premier chapitre j'ai présenté le contexte des services et applications dans le domaine des ITS et j'ai formulé les problématiques qui y sont inhérentes. Ensuite, j'ai mis en exergue les défis à relever et les contributions de notre travail. Ce manuscrit est organisé comme suit :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

- **Le chapitre 2** présente un état de l'art sur les applications et services autour du véhicule intelligent d'aujourd'hui et de demain ainsi que des projets européens et mondiaux concernant tous les ITS. Une classification en fonction de leur complexité est présentée à la fin de la section.
- **Le chapitre 3** détaille la méthodologie utilisée au cours de la thèse pour présenter et tester nos différents modèles. De la plus petite échelle permettant des tests réels de communication véhiculaire afin de valider une application avec un véhicule et un feu en condition réelle ; à la moyenne échelle où des données collectées sur un rond-point à Créteil en France permettent de construire une trace synthétique ; à la plus grande échelle où nous utilisons les données existantes de la ville de Cologne. Nous soulignerons à la moyenne échelle l'importance de faire des simulations sur une trace synthétique issue de données réelles.
- **Le chapitre 4** détaille le service présenté dans le chapitre précédent, basé seulement sur la communication V2I sur une petite échelle : avec une prise de décision locale sur un feu de circulation. J'évalue ensuite ce service sur plusieurs feux afin de percevoir l'impact sur des critères globaux (temps de trajet, temps d'attente, consommation).
- **Le chapitre 5** présente cette fois un service où les feux de circulation du rond-point présenté au chapitre 3, sont retirés et où plusieurs véhicules communiquent entre eux afin de prendre une décision locale et individuelle leur permettant de s'insérer de manière fluide dans ce rond point complexe. J'étudie l'impact sur des critères globaux d'une décision locale prise de manière individuelle. La robustesse du système en terme de perte de paquet et de rayon de communication est également présentée.
- **Le chapitre 6** se situe à plus large échelle : un quartier de la ville de Cologne. Nous présenterons un service basé sur la communication V2I permettant d'améliorer la consommation et le temps de trajet de manière individuelle mais aussi globalement grâce à des décisions prises à certaines intersections dans la ville (nous verrons comment les répartir). J'étudie l'effet de ces décisions prises localement soit avec de l'information locale (intersections communicantes indépendantes) soit avec une information partielle du réseau (intersections communicantes reliées à une unité centrale), sur des critères globaux (temps de trajet, temps d'attente, consommation). Nous verrons qu'améliorer sa consommation en carburant le long de son trajet permet une amélioration globale du temps de parcours des véhicules. La robustesse en perte de paquet et rayon de communication est également étudiée.
- **Le chapitre 7**, propose un service de fluidification du réseau basé sur le V2V également à large échelle. Les véhicules sont assimilés à des fourmis : collectant et échangeant des données ayant une fiabilité limitée dans le temps. Le système est décentralisé et la prise de décision des véhicules se base sur une information partielle du réseau collectée au fur et à mesure de l'avancée du véhicule (comme une fourmi). Nous testerons notre modèle dans des cas allant d'un accident routiers à des cas extrêmes comme des attentats terroristes ou des catastrophes naturelles (tremblement de terre).
- **Le chapitre 8** conclut et propose une synthèse des travaux présentés. Par la suite, j'explore les perspectives et les directions de recherche possibles à ce travail.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 2

Contexte

2.1 Une évolution sociétale 24
2.1.1 Complexité des applications VANETs 26
2.1.2 Vers un véhicule intelligent 27
2.1.2.1 Compréhension de l'environnement : V2RL 27
2.1.2.2 Interactions avec l'utilisateur : V2U 33
2.1.3 Vers un environnement urbain intelligent : les ITS 38
2.1.3.1 Interaction avec l'environnement : V2V et V2I 38
2.1.3.2 Projets futuristes : V2X 46
2.1.4 Classification et discussion 48

Pour relever les défis cités dans le chapitre 1 et atteindre les enjeux, de nombreuses améliorations sont apportées régulièrement sur le marché de l'automobile. Nombre d'entre elles sont orientées autour de l'objet connecté en introduisant une capacité communicante à la voiture, à l'infrastructure ou encore à d'autres pièces placées à l'intérieur du véhicule (smartphone, tablette, ...). La surveillance et la coordination des véhicules à travers la communication permet de construire des transports plus intelligents, une ville plus intelligente. La voiture connectée notamment, a introduit une nouvelle manière d'aborder la conception du déplacement et du véhicule en lui même. La voiture du futur pourrait être vue comme une extension de l'utilisateur à l'instar du smartphone. Dans ce chapitre nous proposons un état de l'art des applications et des projets pensés, créées autour du véhicule et du transport intelligent d'aujourd'hui et de demain. Une classification sera également présentée afin d'identifier quelle est la vision actuelle du futur et quels en sont les points phares.

2.1 Une évolution sociétale

Dans cette section, nous définissons les critères de sélection pour classer les applications et les projets pensés, développés, imaginés autour du véhicule et du transport intelligent. Nous introduirons le concept et le vocabulaire afin de présenter une évolution graphique de ce topique émergent. Pour imaginer le futur, nous devons considérer deux points importants : le véhicule

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

en lui même comme moyen de déplacement d'un point A à un point B et l'utilisation de toutes les applications qui tournent autour de ce déplacement qui en font un transport intelligent. Nous définissons donc deux axes dans notre classification : le véhicule (axe horizontal) et les applications (axe vertical).

Axe horizontal : le véhicule. Cet axe correspond à la manière dont nous percevons le véhicule dans le cadre d'un développement de service. Ces perceptions peuvent être plus ou moins complexes selon l'interaction du véhicule avec son environnement que l'on souhaite étudier.

1. *La vue centrée véhicule.* Aujourd'hui la voiture est un moyen d'aller d'un point A à un point B pour un individu ou plusieurs individus. Dans cette perspective nous ne prenons pas en compte l'environnement du véhicule. Seul l'objet de transport est considéré.
2. *La vue centrée réseau.* Il est évident que le véhicule n'évolue pas seul, il se déplace dans un environnement complexe avec d'autres entités comme les piétons, les buildings, les autres véhicules, ainsi que toute l'infrastructure du monde urbain qui gouverne le mouvement du véhicule : les feux tricolores, les autoroutes, les intersections, les panneaux, etc. Tous ces objets font partie du même réseau et ont un impact les uns sur les autres.
3. *La vue centrée utilisateur.* Les deux précédents points ne mentionnent pas l'élément le plus important dans le réseau véhiculaire à savoir l'utilisateur, c'est à dire le conducteur ainsi que les éventuels passagers. Dans cette vision les besoins ne sont pas les mêmes : l'utilisateur possède des désirs, des opinions, et n'a pas une conduite uniforme et linéaire.

Dans ces trois niveaux nous évoquons une évolution large échelle : "une voiture se déplace (vue centrée véhicule) et communique avec un environnement urbain complexe (vue centrée réseau) selon les désirs de son conducteur et les interactions avec les passagers (vue centrée utilisateur).

Axe vertical : les applications. Le second axe décrit les applications véhiculaires. Celles-ci sont plus ou moins complexes selon la vue que nous adoptons pour le véhicule (figure 2.1).

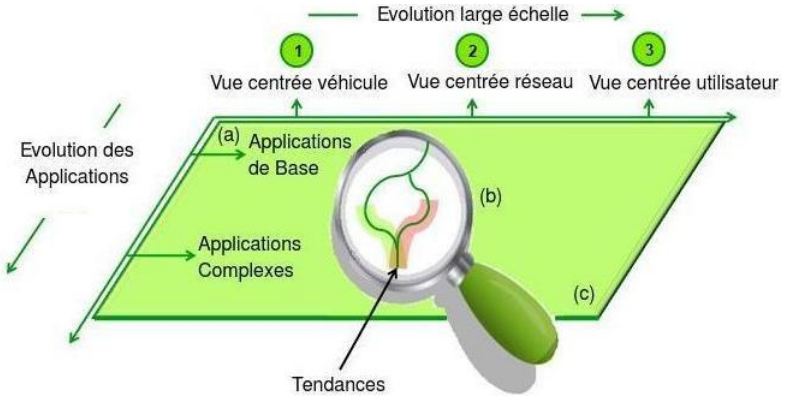

FIGURE 2.1 – Évolution des applications véhiculaires

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Les applications les plus présentes sur le marché avertissent le conducteur d'un possible risque et lui renvoient certaines informations trafic. Ce premier niveau de l'échelle donne lieu a des applications centrées sur le véhicule, voir (a) dans la figure 2.1). Ensuite des applications plus développées permettent de communiquer ces informations avec son environnement, nous sommes alors à un niveau de complexité plus élevé qui est celui de la vue centrée réseau, voir (b) dans la figure 2.1). Enfin le dernier niveau prend en compte l'utilisateur, les passagers avec leurs envies, leurs profils, leurs caractéristiques, nous sommes alors dans la vue centrée utilisateur, voir (c) dans la figure 2.1).
Ainsi les applications dites "basiques" tournent autour des informations que peut capter le véhicule sur son environnement (accidents, trafic dense, piétons, véhicule approchant, etc) pour améliorer la sécurité, c'est actuellement une des premières motivations dans l'innovation véhiculaire. Ensuite des fonctionnalités sont ajoutées au véhicule pour interagir avec son environnement et l'utilisateur. Ainsi les applications se complexifient et de nouvelles tendances apparaissent dans les services véhiculaires.

2.1.1 Complexité des applications VANETs

La complexité d'une application dans le contexte des VANETS peut-être considérée comme une addition de briques simples logicielles et matérielles. Le nombre de briques caractérise ainsi la complexité de l'application. Nous définissons ici quatre catégories pour les classer :

- *V2RL :* Le véhicule collecte des informations perçues dans l'environnement.
- *V2V :* Le véhicule communique ces informations perçues aux autres véhicules.
- *V2I :* Mais aussi il peut les communiquer à l'infrastructure communicante.
- *V2U :* Le véhicule communique avec l'utilisateur

La figure 2.2 nous montre les briques de base qui constituent chaque application dans chaque vue. Ainsi avec une brique V2RL, l'application appartient à la vue centrée véhicule, puis si nous rajoutons à cette dernière une autre brique provenant de V2V ou V2I, l'application se complexifie et devient centrée réseau, enfin avec avec un brique de la dernière catégorie l'application devient complexe de part l'aspect social qu'elle intègre.

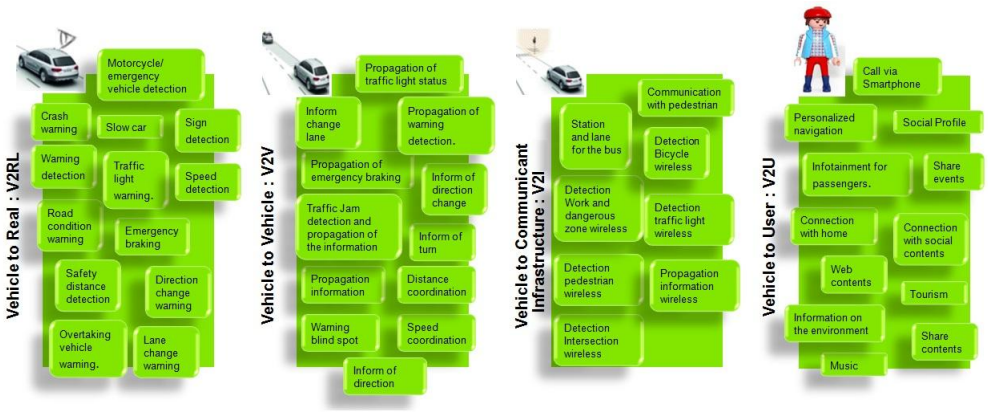

FIGURE 2.2 – Briques composants les applications véhiculaires

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans la vue centrée utilisateur, l'application prend en compte l'utilisateur avec, par exemple, ses relations, sa personnalité, etc. Pour construire une application complexe de ce niveau, des briques V2RL puis V2V et/ou V2I sont utilisées ainsi que des brisques V2U. Cependant, pour le moment, beaucoup d'applications existantes ou pensées se concentrent uniquement sur des briques V2U sans interagir avec les autres domaines. Dans le contexte actuel les évolutions autour de l'utilisateur sont concentrées sur le divertissement, seuls certains services imaginés dans le futur prennent en compte toutes les briques, nous les verrons dans la prochaine section.

Actuellement les applications déployées sont autour de la sécurité, l'efficacité du trafic, l'économie d'énergie dans un premier temps et dans un second temps le divertissement. Mais de manière générale la tendance pour le futur est de se diriger vers la création d'un véhicule autonome, écologique et divertissant. La figure ci-dessous illustre le processus d'évolution actuelle des applications autour du véhicule intelligent.

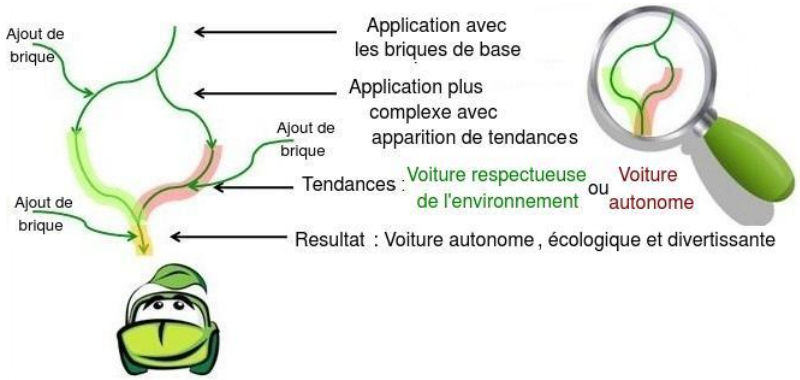

FIGURE 2.3 – Tendances des applications véhiculaires

2.1.2 Vers un véhicule intelligent

Cette première section présente les projets V2RL innovants les plus matures. Nous présentons les applications actuelles où le véhicule est capable de capter son environnement, par exemple, l'assistant de conduite avec l'utilisation de technologies telles que les radars, les caméras, le laser. Quant aux applications V2U, elles se concentrent aujourd'hui d'avantage sur le véhicule comme les applications V2RL. Ainsi nous les présentons ensemble. Puis nous aborderons les applications V2V et V2I dans la section d'après, en effet ce domaine fait intervenir des échanges avec l'environnement, avec les infrastructures, avec la ville ainsi les projets sont plus étendus, plus complexes et représentent les enjeux actuels de l'industrie automobile et des gouvernements.

2.1.2.1 Compréhension de l'environnement : V2RL

Minimiser la congestion (Honda). Le projet de Honda [60] a été présenté à Tokyo, le 26 Avril 2012. Son objectif est de réduire les embouteillages, en particulier lorsque le trafic

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

est aggravé par l'effet d'accordéon (freinage brusque et accélération rapide). Avec l'utilisation d'accéléromètres, le système mesure l'accélération et la décélération du véhicule. Ensuite, grâce à un code couleur (rouge et vert) affiché sur le tableau de bord, le système indique si la conduite est trop irrégulière et donne par conséquent des conseils pour une meilleure conduite. De plus plusieurs voitures peuvent être connectées via le cloud. Le système de régulateur de vitesse est donc en mesure de maintenir une distance constante entre les véhicules. Un test a commencé en Italie et en Indonésie pour analyser son efficacité.

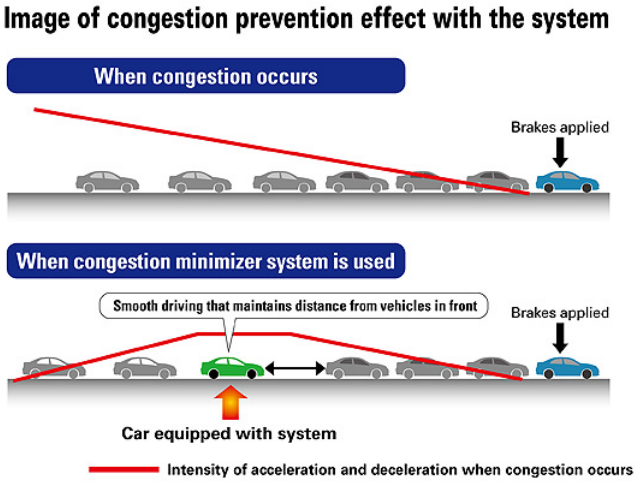

FIGURE 2.4 – Minimiser la congestion (Honda)

'Cyber Navi' ou 'AVIC-ZH99HUD' (Pioneer). Pioneer [98] a présenté son produit pour la première fois en mai 2012 à Tokyo et l'a produit sur le marché en Juillet 2012, seulement au Japon. Cyber Navi est un GPS en réalité augmentée. 70% des voitures sont compatibles avec le système. Il est constitué d'un projecteur laser installé à la place de la visière ; d'un appareil photo fixé sur le rétroviseur central et d'un écran LCD. L'image de 90x30 cm est projetée à 3 mètres devant le conducteur. Les informations affichées sont la vitesse, la direction de la voie, la distance de sécurité, la limitation de vitesse, les feux de circulation et les coordonnées GPS.

BMW : Head-Up Display (Continental). BMW [11], en partenariat avec Continental, se concentre également sur la réalité augmentée pour la navigation grâce au Head Up Display. Une première génération a été commercialisée en 2004 avec un affichage sur le pare brise des indications de navigation, des limites de vitesse, des alertes de sortie de voie, des alertes sur la vision de nuit. Actuellement, Continental fournit cet équipement pour la BMW Série 3. L'étude de la génération suivante actuellement en test a commencé en 2011 avec des marqueurs virtuels superposés sur le monde réel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

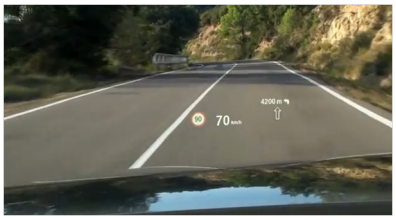

FIGURE 2.5 – Affichage tête haute première génération (BMW)

FIGURE 2.6 – Affichage tête haute, future génération (BMW)

Réalité Augmentée et système d'infodivertissement (Intel). Yi Wu, directeur de recherche en interaction et expérimentation à Intel Labs à Santa Clara, travaille sur un système de navigation automobile en réalité augmentée (des informations Windows s'afficheront sur le pare brise pour la navigation) [63]. Intel travaille également sur un système d'info-divertissement à bord du véhicule, afin de fournir des informations (sur la navigation) et des divertissements (musique, vidéo, radio, etc.) aux conducteurs et aux passagers (via écran tactile, reconnaissance vocale, gestuelle). Ils travaillent avec Nissan, Kia Motors, Toyota, Denso, la Chine TSP, GAIA Guangzhou Automobile Group et Hawtai, et se concentrent sur la fusion entre le mobile et le véhicule, les services basés sur le cloud, le contrôle via smartphone (touche virtuelle, vidéo surveillance) et la connectivité (Internet, 3G pour le courrier électronique, web, TV). Le système de recherche sera en mesure de prendre des informations importantes sur le Web comme le meilleur prix d'une station-service ou le café le plus proche, il sera également en mesure de payer et télécharger de la musique, payer des factures, envoyer et lire des e-mails.

PSA Peugeot Citroën : 'Peugeot connect Apps'. PSA Peugeot Citroën a proposé en Octobre 2012 une interface à écran tactile avec des applications essentielles du Web dans le véhicule comme des informations sur le trafic ou encore comment trouver le parking le plus proche disponible partout en Europe [99]. L'entretien de la voiture peut être aussi vérifié sur téléphone intelligent via l'application 'itouch'.

'XL Journey Mate Mini' (BMW). Cette application commercialisée sur la Mini en 2014 aide pour la navigation avec de la diffusion de rapports sur le trafic en temps réel. Le système connaît les routes les plus empruntées par le conducteur, il lui rappelle quand il est temps de faire le plein, des messages lui notifient des appels téléphoniques prévus ou des rendez-vous notés sur le smartphone, une aide à localisation des espaces de stationnement est incluse, enfin il dirige le conducteur à pied jusqu'à sa destination finale une fois sortie du véhicule.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

'Concept Discovery Vision' (Land Rover). Ce concept-car utilise des lasers infrarouges pour balayer le sol devant le véhicule et ainsi prévoir la réaction de ce dernier. Ils permettent également d'estimer la profondeur d'une flaque avant que la voiture n'y pénètre. Une conduite semi-autonome à faible vitesse est également possible. L'utilisateur peut projeter des images sur la route avec la lumière laser (triangle de sécurité). Ce concept propose également un contrôle via les gestes et la voix. Des caméras peuvent également projeter des images et vidéos sur les fenêtres. Enfin, une vue numérique de la terre peut être projetée sur le capot, par conséquent, l'avant du véhicule, est pratiquement invisible depuis le cockpit.

'Localisation en réalité augmentée (LRA)'. Ce projet débuté en 2013-14 est une réflexion sur le véhicule autonome, avec une approche qui consiste à étudier de nouvelles interactions avec le pilote en 2020. LRA examinera plus spécifiquement la délégation de la conduite sur autoroute ou voie rapide. Différents partenaires sont sur ce projet : l'Institut Technologique de Recherche (IRT), Alstom Transport, M3 Systems, Oktal, Renault, Coffre-River, Sysnav, Valeo et le CEA-List.

FIGURE 2.7 – Localisation en réalité augmentée (LRA)

'Système de navigation en réalité augmentée (HMD)' (Siemens). L'université de Linz et Siemens ont travaillé sur un système de navigation basé sur une technique de vidéo : un HMD (Head-Mounted-Display) [107]. Ce projet a commencé en 2000 et s'est terminé en 2005. Les appareils sont un GPS, une carte de la zone (topographie), une caméra, un odomètre pour mesurer la vitesse, un gyroscope pour mesurer et maintenir l'orientation, un choix de plusieurs vues : la vue à vol d'oiseau sur l'autoroute et la réalité augmentée sur les intersections. C'est un concept, l'étape suivante est de projeter ces informations sur le pare brise.

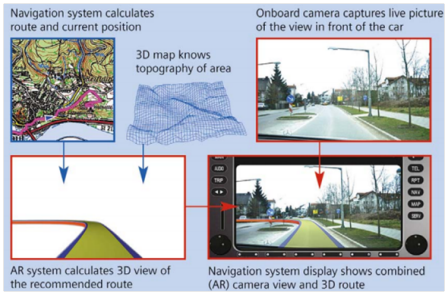

FIGURE 2.8 – Système de navigation de Siemens et l'université de Linz

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

'iOnRoad' (Microsoft). Beaucoup d'applications smartphone développées pour le véhicule sont identiques, nous choisissons de présenter une des plus téléchargée. Celle ci existe depuis 2010, la réalité augmentée (grâce à la caméra du smartphone) permet une alerte auditive et visuelle sur les distances de sécurité. L'originalité de cette application est la possibilité pour le conducteur de cumuler des points de sécurité durant ses trajets et de les partager avec les autres utilisateurs sur son 'Driving Profile' mais aussi sur Facebook. L'application peut lire et notifier la réception de messages et finalement lorsque le véhicule se gare, iOnRoad garde en mémoire sa localisation GPS et prend une photo pour retrouver facilement la voiture. Cependant ce système est limité : les distances de sécurité ne s'adaptent pas en cas d'embouteillage et le système ne fonctionne pas la nuit.

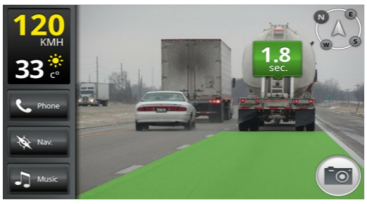

FIGURE 2.9 – Application sur smartphone : iOnRoad

'Google car' (Google). Google a le projet de développer la voiture entièrement autonome, capable d'aller d'un point A à un point B sans conducteur [81]. Leur voiture est équipée d'un Laser LIDAR (Ligth Detection And Ranging), une technologie de mesure à distance basée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur, capable de créer une image 3D de l'environnement. Il capture les objets mobiles tels que les autres véhicules, les piétons, les cyclistes, mais aussi les objets stationnaires tels que les panneaux, les feux de circulation. La voiture possède également des capteurs. Un algorithme gère le changement de voie et le système utilise les informations de Google Steet View. La voiture est capable de céder le droit de passage selon les lois de la circulation. Certains de ces modèles sont autorisés à rouler dans le Nevada depuis juin 2011, en Floride et en Californie depuis septembre 2012. L'inconvénient est le coût, certaines estimations établissent la facture entre 150 et 200 000 dollars à ajouter au prix de la voiture.

'Automatisation à Basse Vitesse : ABV' (Inria). Le projet vise à démontrer la faisabilité d'une voiture entièrement automatisée à des vitesses en dessous de 50 km/h comme Google dans le précédent paragraphe. Les chercheurs Inria sont en charge de l'automatisation d'une Citroën C1. Le système ABV soulage le conducteur d'accomplir les tâches monotones de conduite à faible vitesse comme le freinage, les changements de voie ou encore le maintien des distances de sécurité. Lorsque l'application termine sa tâche, le conducteur reprend le contrôle du véhicule, s'il ne parvient pas le véhicule s'arrête automatiquement. les algorithmes suivent le schéma classique dans le contexte véhiculaire : la perception, la planification et le contrôle. Les tests sont fait sur la piste Satory (Versailles, France). La Citroën est équipée de capteurs (caméra

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

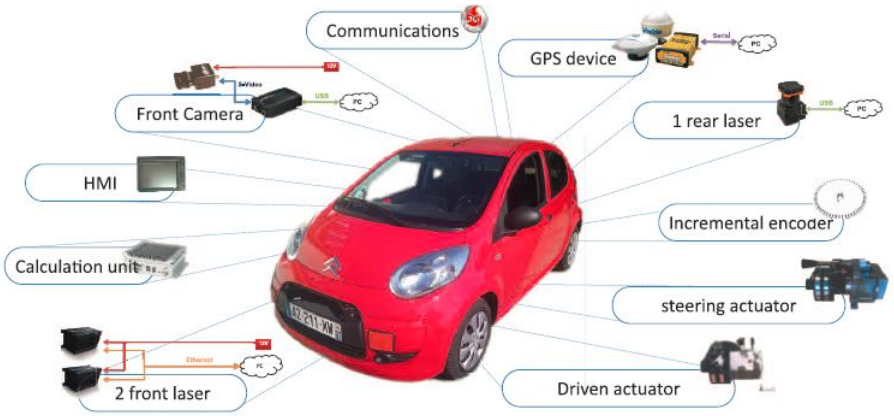

FIGURE 2.10 – Projet ABV

frontale, lasers). Un ordinateur permet les calculs de freinage et d'accélération.

'Projet Magnétique' (Volvo, PATH San Diego). Volvo a déployé 100 véhicules à Gothenburg en Suède en 2014 afin de tester une technologie qui peut être facilement déployer pour guider des véhicules autonomes. Des aimants sont noyés dans la chaussée à 200 mm de profondeur. Une solution simple et bon marché pour améliorer la sécurité. La voiture est alors équipée d'un laser capable de détecter le champ magnétique et de suivre l'alignement des aimants. Volvo estime que contrairement aux technologies de positionnement établies telles que le GPS ou des cameras qui sont limités dans certaines conditions, (tunnel, nuit, météo, ...) les aimants intégrés dans la chaussée ne sont pas sensibles aux obstacles physiques et aux conditions météorologiques. Ce projet a vu le jour grâce à un partenariat avec l'administration suédoise des transports.

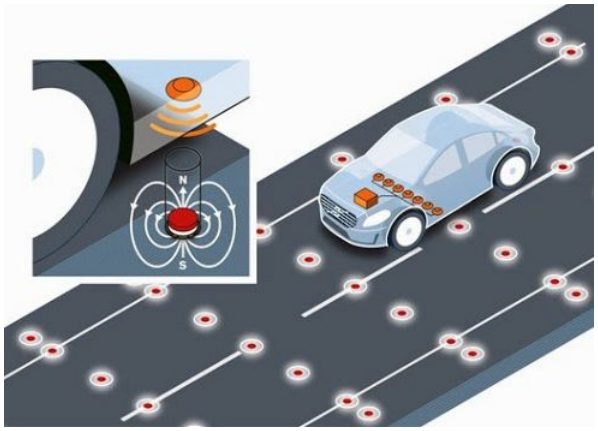

FIGURE 2.11 – Projet Magnétique (Volvo)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

'BluePrint pour la mobilité' (Ford). Au 'Mobile World Congress' 2014 et au CES 2015 (Consumer Electronics Show) Ford a présenté son projet sur la voiture autonome. Le véhicule possède 4 capteurs LIDAR qui peuvent effectuer en tout 2.5 millions de mesures par seconde, ce qui lui permet d'avoir une carte 3D de l'environnement jusqu'à une distance de 70 m. Ford lance un partenariat avec l'université technique d'Aix la Chapelle pour développer des interfaces homme-machine compatibles avec les futures voitures autonomes. Il collabore également avec le MIT (Massachusetts Institute of Technology) pour développer des algorithmes d'apprentissage pour anticiper les mouvements des véhicules et des piétons. Ford travaille également avec l'université de Standford pour analyser des zones se situant derrière les obstacles. Leur but est d'équiper le véhicule d'une capacité de jugement.

'Vehicule Autonome' (Move'o, VEDECOM). Le pôle de compétitivité de R&D automobile et des transports publics Move'o travaille sur des projets pour renforcer la compétitivité internationale des entreprises et des territoires français. En 2014, Mov'eo décide de grouper des 'PME' françaises spécialisées dans la haute technologie afin de fournir une réponse globale au groupe industriel dans le contexte des systèmes d'assistance au conducteur. Move'o comprend donc 7 PME possédant les compétences et les technologies pour répondre aux besoins actuels et futurs des constructeurs et équipementiers automobiles sur le sujet du véhicule autonome.

Traffic Jam Assistant

'Vehicule Autonome' (Autres Projets). BMW travaille sur un projet basé sur le système de conduite semi-autonome sur autoroute et également dans les embouteillages [14]. Audi a également un projet de recherche sur un assistant dans les embouteillages (Janvier 2012) [6]. Ford a annoncé en Juin 2012, le développement de 'Traffic Jam Assist' pour aider à soulager le conducteur durant des congestions routières [47]. Volkswagen a présenté un projet en Juin 2011 (avec une démo) sous la forme d'un pilote automatique temporaire [118]. Mercedes travaille également sur un assistant en cas de trafic (pour 2013). Général Motor travaille également là dessus depuis 2008 [93]. Cadillac présente 'Super Cruise 2012' pour détecter les voies sur autoroute et garder ainsi une conduite autonome (des problèmes apparaissent lorsque les lignes réfléchissantes sont effacées) [18]. L'Inria (Institut National de Recherche en Informatique) travaille sur un Cybercar, la voiture est entièrement automatisée pour transporter des personnes ou des marchandises, ces voitures ont été utilisées dans le projet CityMobil (voir la section 2.1.3.1).

2.1.2.2 Interactions avec l'utilisateur : V2U

Connected Car Fund (Nokia). En 2014, Nokia a investi dans des firmes et des starts-up spécialisées dans le véhicule intelligent. Nokia veut identifier et investir dans des compagnies où les innovations seront fondamentales pour le véhicule connecté pour appuyer entre autre leur système de mapping (HERE) et leurs propres services et produits. Leur vision est que chaque véhicule va devenir une plate forme personnalisable d'adoption d'une nouvelle technologie comme les smartphones et les tablettes. Plus particulièrement ils investissent sur les données personnelles des conducteurs.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Toyota Friend (Toyota). Ce projet est un partenariat entre Toyota et Salesforce [112]. Salesforce est une entreprise de software basée à San Fransisco. Leur association a débuté en mai 2011 et la première implémentation de leur plug-in a débuté au Japon en 2012 dans des véhicules électriques. Leur but est de créer un réseau social entre l'utilisateur, le véhicule, Toyota et le concessionnaire. Chaque membre peut-être notifié sur smartphone de l'état de son véhicule (batterie, rechargement). Ce réseau est privé mais peut-être étendu à la famille, aux amis par Twitter ou Facebook.

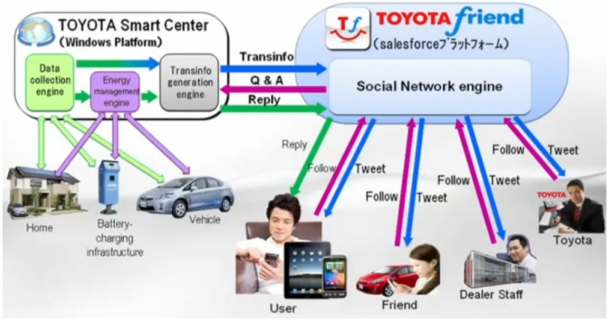

FIGURE 2.12 – Toyota Friend

LTE Connected car (Alcatel-Lucent). C'est un concept car [92] incluant le programme "ng-connect" présenté en 2009. C'est un écran intégré à la voiture qui amène de multiples applications au conducteur et au passager comme une assistance de conduite (navigation, maintenance) mais aussi du divertissement (connexion web, musique, vidéos, jeux, etc) et une communication avec son smartphone ainsi qu'avec sa maison : 'home control' qui permet de vérifier la sécurité de sa maison directement dans sa voiture (portes fermées, lumières, caméras, contrôle de l'énergie, etc). Toutes ces applications sont disponibles via le cloud avec un accès à un serveur distant.

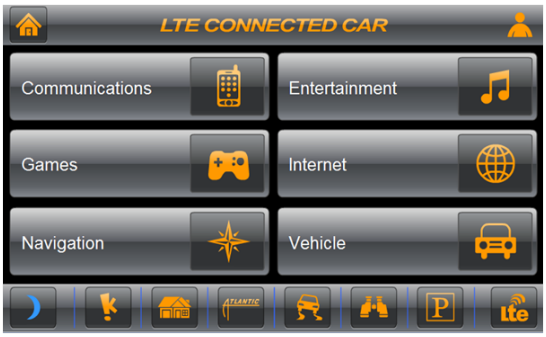

FIGURE 2.13 – Alcatel-Lucent and Toyota : LTE connected car

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Fleet tweet (Mercedes). Ce produit a été commercialisé en décembre 2011 pour les fêtes de fin d'années [86]. C'est un système de "Park Assist" avec cinq caméras dont une à 360 degrés. Le véhicule est alors capable de reconnaître un emplacement libre en passant à côté et de tweeter l'emplacement. Le système GPS est connecté au compte Twitter pour donner les coordonnées en temps réel des places libres détectées.

Fleet Tweet

Hackathon (Facebook et Ford). En février 2012, un Hackathon a eu lieu au campus Palo Alto de Facebook pour expérimenter les services sociaux futurs dans le véhicule [48]. Pendant deux jours des équipes ont imaginé et développé des services connectés avec l'utilisateur. Comme par exemple, trouver un restaurant recommandé par des amis, jouer des musiques postées par des amis sur Facebook de manière automatique, poster sur Facebook la position du véhicule et son trajet, utiliser le chat de Facebook dans la voiture.

Projet Detroit (Microsoft et West Cost Custom). Dans un appel d'offre, l'équipe Microsoft Connected Car a exposé leur volonté de mettre en évidence toute leur technologie et leurs produits sur un seul véhicule. En Juin 2012, le concept car 1967 Ford Mustang Fastback a vu le jour avec les technologies suivantes : Kinect, Windows phone, tablette Windows 8, wifi, 4G, Windows Azure, HUD [89]. Pour Microsoft le véhicule du futur connaît son conducteur et interagit avec lui naturellement de manière vocale, gestuelle, ou encore avec la détection des expressions du visage. Il connaîtra ses habitudes, et aura des offres personnalisées. Le concept car possède des services comme localiser, et contrôler sa voiture à distance. Il possède un affichage tête haute pour l'assistance à la navigation mais aussi pour afficher des points d'intérêt personnalisés, ainsi qu'un affichage des messages sur le pare brise arrière. Les caméras implantées sur le véhicule peuvent être vues via une application sur le smartphone. Enfin, pour le plaisir une Xbox-360 est disponible à l'arrière du véhicule pour jouer sur le pare prise arrière.

Les applications Microsoft. Microsoft effectue des partenariats avec de nombreuses entreprises automobiles pour intégrer des services aux utilisateurs dans les voitures : comme Blue&Me avec Fiat, SYNC avec Ford et UVO avec Kia. Les interactions entre l'utilisateur et la voiture se font soit vocalement, soit par le toucher pour accéder à son téléphone ou à sa musique par exemple. Microsoft travaille également avec Honda, Nissan, BMW, Mercedes-Benz, Aston Martin et McLaren. Toyota et Windows travaille sur 'Toyota Media Service' avec l'idée de connecter les véhicules Toyota hybrides ou électriques avec le Windows Azure Cloud pour le divertissement dans le véhicule.

Mbrace2 (Mercedes). Mercedes a présenté au CES 2012 leur future interface HMI (Human-Machine Interface) qui est commercialisée depuis 2013. Mbrace2 [88], une amélioration de Mbrace, est un système d'assistance capable de contrôler à distance le véhicule via le smartphone ou l'ordinateur. Il propose des services de sécurité comme le report d'un accident, l'appel d'urgence, l'alerte en cas de vol ou tentative de vol sur le véhicule, la localisation du véhicule sur un parking, le contrôle de la fermeture et l'ouverture à distance. L'information trafic et la météo sont disponibles. Mbrace2 agit au niveau social avec un accès à Facebook, Yelp et

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Google pour communiquer sa localisation à ses amis par exemple, leur faire savoir l'heure de notre arrivée, chercher un restaurant, un magasin, acheter ses places de cinéma ou faire une réservation dans un restaurant. Une option de "Geofencing" est disponible : si le véhicule sort d'une aire prédéfinie par le conducteur, le propriétaire en est informé, il peut savoir également où a été conduit le véhicule à tout moment. Le véhicule est également connecté en permanence au Cloud pour avoir les dernières mises à jour disponibles. La sécurité n'est pas négligée avec des fonctions qui se bloquent lorsque le conducteur conduit et des alertes automatiques entre le conducteur et son concessionnaire Mercedes-Benz.

IoTS Lab (Bosch et l'université de Saint Gall). Bosch et l'université de Saint Gall ont construit un laboratoire basé sur l'internet des objets (Internet Of Things : IoTs) en mars 2012 avec des premiers résultats en 2013 [15]. Dans ce contexte, Bosch a mis en place un projet pilote à Singapour appelé 'E-mobility' qui fournit des services aux utilisateurs de véhicules électriques pour atteindre leur destination dans les meilleures conditions : lieux de recharge sur le trajet en fonction de la quantité d'énergie disponible dans le véhicule, les conditions de trafic et la possibilité d'utiliser des transports en commun selon les préférences des conducteurs. IoTS Lab travaille sur la connectivité dans la mobilité, l'énergie, la ville connectée, l'industrie, et la personnalisation des utilisateurs sur leur trajets (attractions touristiques, loisirs, etc). Il travaille plus particulièrement sur les Business Models.

Projet SiAM (DFKI). Trois chercheurs travaillant sur le projet SiAM (Situation Adaptive Multimodal Interaction for Innovative Mobility Concepts for the Future) au sein de l'institut de recherche allemande sur l'intelligence artificielle (DFKI : German Research Centre for Artificial Intelligence) ont été récompensés aux 'Environnement intelligent 2012' pour leur publication : 'Personalized In-Vehicle information Systems Building an application Infrastructure for smart Cars In smart Spaces' [46]. Leur application "eye box" consiste à communiquer sur l'environnement qui entoure le véhicule. Par exemple le conducteur ou le passager a juste à prononcer : 'quel est ce bâtiment ?' ou 'donne moi plus d'information sur ce monument' et le système répond grâce à une technologie de vision intelligente. Il est aussi capable de reconnaître le genre et l'âge du conducteur. Ces chercheurs travaillent aussi pour le projet SimTD (voir la section 2.1.3.1).

'Windows to the world' (Toyota). Toyota et le CIID (Copenhagen Institute of Interaction Design) travaillent depuis 2011 sur un concept de divertissement pour le passager via sa fenêtre [111]. Le passager pourra dessiner des images visibles de l'extérieur, identifier des objets de l'environnement extérieur dans d'autre langues, traduire, percevoir des distances, faire des zooms sur le paysage, identifier une constellation dans le ciel, etc... Deux prototypes sont opérationnels.

Windows

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

'Windows of opportunity' (General Motor) Un projet a été donné par General Motor à des étudiants de l'académie des arts et du design en Israël sur le thème 'Windows of opportunity' en 2012 [94]. Le principe est de transformer (comme le projet de toyota) la fenêtre en divertissement. Les applications suivantes ont été pensées :

Windows

- Otto : information sur le paysage et la météo
- Foofu : dessiner sur la fenêtre
- Spindow : voir la fenêtre de n'importe qui dans le monde
- Pond : partager de la musique et des messages avec les véhicules équipés.

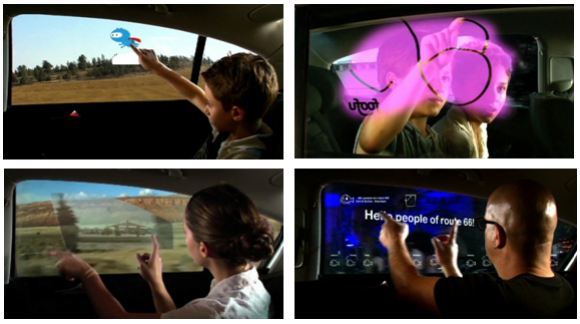

FIGURE 2.14 – Applications imaginées par des étudiants pour General Motor

Connected Drive Concept Car (BMW). BMW a présenté son concept car avec un tableau de bord tactile et un écran pour le passager [13]. La voiture a accès à la recherche de restaurants et peut faire des réservations. Les informations pertinentes pour le conducteur trouvées par le passager peuvent être transmises de l'un à l'autre en toute sécurité (exemple : trajet pour aller au restaurant trouvé par le passager). Le système possède un affichage tête haute pour la navigation, une caméra pour la vision arrière et le trafic en temps réel. De plus un utilisateur peut envoyer des informations directement de l'ordinateur au véhicule.

Connected Drive

Autres projets

Toyota avec Entune (écran tactile, reconnaissance vocale, Bluetooth) inclut une recherche Bing pour les trajets avec une reconnaissance vocale. Il donne accès au trafic, aux résultats sportifs, à la météo, aux prix des stations, aux statistiques personnelles de conduite. Une radio personnalisée est aussi inclue, ainsi que la possibilité d'une réservation (restaurants, cinémas) et le téléchargement de musique.

Ford avec Sync (écran tactile, reconnaissance vocale, Bluetooth, USB, card SD, jack) inclue la navigation, peut lire des messages, contrôler le climat intérieur de la voiture, contrôler le smartphone, et la radio vocalement. L'application est capable de jouer de la musique du smartphone, télécharger les contacts et les photos sur un écran personnalisé dans le véhicule,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

afficher une vidéo quand le véhicule est à l'arrêt, porter assistance, émettre des informations, des résultats sportifs et la météo.

BMW possède les mêmes applications citées dans le paragraphe précédent via l'Iphone.

Enfin Honda avec HondaLink (Bluetooth, USB, écran tactile, Aha radio) est capable de lire les statuts Facebook ou Twitter, et des mails. Le conducteur peut écouter mais ne peut pas répondre. Avec Yelp, il recommande des restaurants et des cafés. Une radio-web personnalisée et l'envoie de sms dictés est possible.

2.1.3 Vers un environnement urbain intelligent : les ITS

Dans cette section nous détaillons les projets autour du V2V et du V2I. Les communications entre les véhicules et avec l'infrastructure impliquent de repenser l'environnement urbain avec des applications rendant la ville connectée et intelligente. Dans cette section nous détaillons les applications ainsi que de nombreux projets ITS.

2.1.3.1 Interaction avec l'environnement : V2V et V2I

ITP : Intelligent Truck Parking L'application ITP est un projet R&D de l'agence de technologique de république tchèque. Le but est de prédire l'occupation des parkings pour camions le long des autoroutes et d'informer les conducteurs via la communication V2X pour leur permettre de prévoir leurs arrêts en fonction de la législation.

Internet of cars (Volvo). Volvo et SICS (Swedish Institute of Computer Science) ont lancé un projet collaboratif pour ouvrir sur le marché des applications basées sur l'ordinateur central du véhicule. Leur vision de l'internet des voitures (IoC : Internet of Cars) avec des systèmes embarqués, apportera de nouveaux services aux usagers de la route. L'idée est de laisser le véhicule échanger des informations sur l'état des routes, les embouteillages, l'heure d'arrivée, etc, pour rendre les voyages plus sûrs, cependant cela requiert un haut niveau de robustesse et de sécurité. Dans ce projet, un framework sur le système informatique du véhicule est en cours d'élaboration. Pour leur test, un couple d'ordinateurs et de Rasberry Pis, seront interconnectés et utilisés pour simuler les unités de contrôle électronique d'une vraie voiture. Un exemple d'application : si l'information de la vitesse est échangée directement entre les voitures, la voiture peut détecter un arrêt brutale dans la circulation en amont et adapter sa vitesse pour éviter une collision. Une première démonstration est prévue courant 2015.

Un système autonome d'alerte du trafic grâce au V2X. Des chercheurs du FHR travaillent sur un système qui utilise une combinaison de plusieurs capteurs comme les radars, les boucles à induction, les caméras, et les informations relayées par les véhicules. Le système analyse les données et identifie des situations dangereuses comme des travaux, des objets sur la route, des mauvaises conditions météorologiques, des freinages d'urgence, etc. Grâce à ce système les conducteurs sont informés en temps réel et avec une géolocalisation précise du

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

danger. De plus la combinaison des informations de capteurs de différente nature permet d'obtenir des données fiables et de qualité. Les éléments utilisés par leur système sont : ITS G5, GeoNetworking, CAN Bus, capteurs, Carte numérique, des messages CAM et DENM [42]. Les informations sont retransmises au conducteur via un HMI avec écran tactile. Ce projet a été fondé par les ministères Bavarois de l'économie, du transport et de la technologie.

Sartre (Volvo) SARTRE est l'acronyme de Safe Road TRains for the Environment [119]. Il est cofinancé par la commission européenne dans le cadre du FP7. Les participants sont Idiada et Robotiker-Tecnalia (Espagne), l'institut d'ingénierie automobile de l'université RWTH Aachen, l'institut pour l'automobile de l'université d'Aix-la-Chapelle, ainsi que l'institut suédois de recherches techniques, Volvo Car Corporation et Volvo Technology Corporation. Le principe est la formation de files de voitures sur les voies à grande vitesse avec un conducteur professionnel à sa tête. Les conducteurs de la file peuvent alors faire autre chose en toute sécurité. Les technologies et les équipements utilisés sont : l'ACC (Adaptive Cruise Control), des caméras, des radars, la technologie du laser afin de détecter les collisions, de garder sa voie de circulation, d'avoir des informations sur les angles morts, d'aider à se garer et d'adapter ses distances de sécurité. Les informations sont transmises par HMI et permettent aux véhicules de rejoindre un peloton ou de le quitter. C'est la technologie Wifi avec le 802.11p qui permet de gérer et de coordonner les véhicules dans les pelotons. Les avantages de leur système sont : la sécurité dans le transport des voyageurs, l'amélioration du trafic (la vitesse des pelotons est limitée à 90 km/h), et une consommation améliorée. Leur prochaines étapes se baseront sur l'étude de situations d'urgence comme des obstacles à éviter ou un freinage d'urgence. Certaines fonctionnalités du système sont déjà disponibles dans certains camions Volvo depuis 2014.

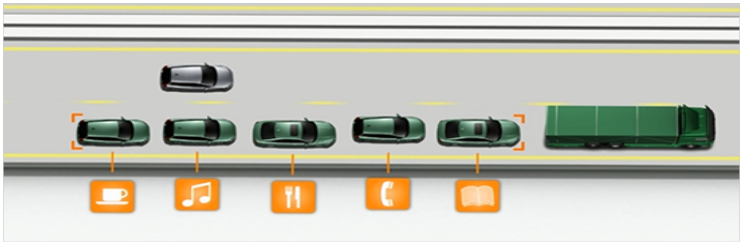

FIGURE 2.15 – Projet SARTRE

Travolution project (Audi). Audi a débuté ce projet en 2006 [105], avec des résultats présentés à Ingolstadt en juin 2010. Leur système est basé sur la communication sans fil LAN (Local Area Network) par UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Une recommandation de vitesse est affichée sur le tableau de bord lorsque le véhicule approche d'un feu de circulation, afin de ne pas s'arrêter, la gestion de la vitesse est alors contrôlée par le ACC (Adapative Cruise Control). Si un arrêt est indispensable, le conducteur sait combien de temps il doit patienter avant le feu vert. Leurs tests ont montré un baisse de la consommation en carburant de 17% et une réduction des émissions de CO2 de 15%. Leur projet comprend également un paiement en ligne dans les parkings et les stations services avec une communication V2I.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Swarco Swarco, implenté en Austriche et membre du consortium Car2Car communication, existe depuis 2010 et se focalise sur les bénéfices d'une mobilité coopérative ainsi qu'une optimisation des feux de circulation. En 2012 ils ont testé différents cas d'utilisation avec le 802.11p comme par exemple le contrôle de six feux de circulation coopérant ensemble (pour l'onde verte (*green wave*) notamment : avoir les feux verts les uns à la suite des autres). Les services proposés au niveau des feux sont : une alerte en cas de violation du feu rouge, une adaptation de la phase du feu en fonction du taux d'occupation et une recommandation de la vitesse. Ils utilisent les standards du 802.11p avec les messages SPAT (Signal Phase and Timing Message, [41]) pour connaître le temps du feu, les messages DENM (Decentralized Environmental Notification Message, [42]) pour alerter les véhicules et les messages CAM (Cooperative Awareness Message, [42]) pour que le véhicule d'urgence puisse obtenir le feu vert. Leur études portent également sur la priorité des transports en commun dans le milieu urbain, et l'alerte en cas d'accident dans la ville.

C3World, une voiture connectée dans un monde connecté : Volkswagen Ce projet [117] a débuté en 2007 et les derniers résultats ont été présentés au CeBIT 2012. Ce consortium a été créé par Volkswagen et trois instituts de recherches (institut de technologie des communications de Brunswick, l'institut de technologies et de communication de l'université Leibniz de Hanovre et l'Institut OFFIS technologie de l'information à Oldenburg) pour étudier les informations et la technologie du véhicule de demain ainsi que la robustesse et la sécurité des communications sans fil dans l'environnement urbain. Ils possèdent trois axes de recherche : le premier est sur le V2X avec des applications liées à la sécurité routière, des études de réseau urbain hybride (c'est à dire avec différents moyens de communication), des simulateurs et des modèles de trafic. Le second se focalise sur l'équipement et la connexion entre le véhicule et le mobile. Enfin le dernier se concentre sur les données web pertinentes au sein d'un véhicule, sur l'accès intuitif, et sur des filtres de données en fonction du contexte autour du conducteur.

Tests sur le terrain (Denso). Les tests de systèmes embarqués en conditions réelles (Field Operational Tests - FOT) sont des projets de recherche cherchant à évaluer à grande échelle l'impact des systèmes ITS. Denso et l'université Tongji à Shanghaï ont commencé un FOT en 2012 sur des routes publiques avec la technologie V2X [34]. Leurs tests se focalisent sur la localisation et la vitesse des véhicules d'urgence avec une communication directe avec les véhicules autour et avec l'infrastructure. Par exemple quand un véhicule d'urgence souhaite passer, les feux sur son trajet se mettent au vert et les véhicules savent à l'avance sur quelle voie se mettre. Denso travaille sur la technologie V2X depuis 2003 et il fait parti également du programme américain : Connected Vehicle Safety Pilot Program.

SmartWay. SmartWay est un FOT et s'étend de 2004 à 2010 au Japon, conduit par l'institut national pour la gestion des paysages et de l'infrastructure (NILM). Il comprend 40 véhicules et 2522 tests sur 7 villes et 23 partenaires privés. Ils ont développé le VICS (Vehicle Information and Communication System) et l'ETC (Electronic Toll Communication, l'équivalent du télépéage en France). VICS permet d'avoir une information du trafic en temps réel avec des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

calculs de trajets. Actuellement 1600 stations ITS sont déployées au Japon et la bande 5.8GHz est utilisée pour l'ETC.

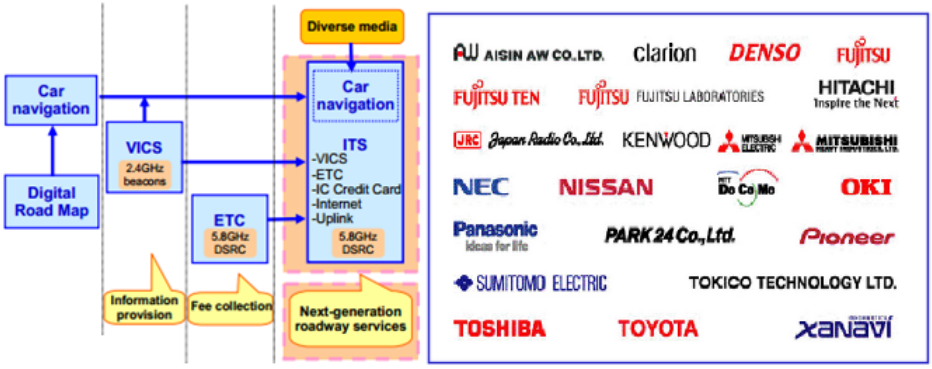

FIGURE 2.16 – Le projet SmartWay et ses partenaires

Connected Vehicle Safety Pilot Program (US Department of Transportation). Ce test [66] a débuté en Août 2012 pour une durée d'un an. Leur but est de collecter des données empiriques pour détailler de manière précise le potentiel et les bénéfices des ITS notamment au niveau de la sécurité routière. Il est dirigé par RITA (Research and Innovative Technology Administration) avec de multiples partenariats industriels (Ford, General Motor, Honda, Hyundai/Kia, Mercedes-Benz, Nissan, Toyota et Volkswagen/Audi). 2800 voitures, camions et bus sont équipés par Kapsch, ITRI International Inc, Cohda Wireless, Cisco Systems Inc et Savari Networks. C'est un des tests grandeur réelle le plus important au monde. Le test a eu lieu a Ann Arbor dans le Michigan avec 29 unités de bords de route et 122 kilomètres de routes. Trois dispositifs sont testés, le premier est installé pendant le processus de fabrication du véhicule directement intégré à l'ordinateur du véhicule, il permet de traiter un grande quantité de données. Ce dispositif émet et reçoit des messages BSM (Basic Safety Message, norme SAE J2735, équivalent des messages CAM en Europe), communique des données sur la vitesse, l'accélération, la décélération et le freinage entre autres. Le second est disponible sur le marché secondaire ('aftermarket'), il n'est pas connecté à l'unité du véhicule mais permet d'accumuler les données de l'environnement (données GPS, les messages de sécurité des autres véhicules, etc). Il peut également émettre des messages BSM pour avertir d'autres véhicules de leur présence ou d'un conflit potentiel. Enfin le dernier dispositif est un boîtier de communication qui se base uniquement sur l'émission de BSM. Les applications principalement testées sont la détection de collision, l'alerte en cas de freinage, les mouvements aux intersections, l'alerte des angles morts, l'alerte de changement de voie et l'alerte sur la vitesse. A partir de ce projet, l'agence NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) prendra une décision sur comment déployer le V2V et le V2I dans le réseau véhiculaire.

Compass4D Ce projet est coordonné par ERTICO (c'est un réseau européen qui regroupe les parties prenantes des ITS en Europe sur la mobilité coopérative, l'éco-mobilité, la sécurité et l'info-mobilité). ERTICO a été fondée à l'initiative des principaux membres de la commission

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

européenne, des ministères de transport de différents pays et des acteurs industriels en Europe. Compass4D est un projet pilote de coopération sur des services de sécurité et de durabilité en faveur du déploiement des ITS, il s'étend de janvier 2013 à Décembre 2015. Le projet étudie trois services : l'alerte sur une collision, le non respect du feu rouge et l'efficacité des intersections. Leur but est de montrer les points positifs sur le trafic, le faible coût de déploiement, les bénéfices d'une standardisation et enfin l'importance d'une coopération internationale. Sept villes en Europe participent à ce projet ainsi que 31 partenaires industriels.

SimTD. SimTD acronyme de 'Safe intelligent mobility-Test FielD' est un projet allemand s'étendant de 2008 à 2012, visant à évaluer les bénéfices de la communication V2X sur le trafic, la sécurité, l'efficacité des services proposés dans le domaine mais aussi évaluer l'acceptation des utilisateurs de cette nouvelle technologie [124]. Les participants sont Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel et Volkswagen avec 120 voitures communicantes et roulant dans la circulation réelle de Francfort. Les fournisseurs Bosch et Continental se sont alliés avec le service de télécommunication d'Allemagne (Deutsche Telecom), des instituts de recherche et des universités font aussi partis du projet (les universités de Francfort, Wurzburg, Munich et Berlin, et DFKI, ainsi que les autorités publiques et le consortium C2CC [17]). 100 unités de bord de route sont utilisées (Intelligent Roadside Stations, IRS), 2 stations centrales ITS, 120 unités pour véhicules (ITS Véhicle Station, IVS) avec une unité d'application (AU) et une unité de contrôle de communication (CCU) utilisant IEEE 802.11p, UMTS, IEEE 802.11b et IEEE 802.11g. le CCU possède également un GPS différentiel (DGPS) qui est une amélioration du GPS avec une erreur de localisation plus faible. Le CCU est également connecté à l'unité d'application via Ethernet, et l'AU est basé sur un langage JAVA/OSGi (voir la figure 2.17). SimTD possède une approche différente des autres projets ITS, en effet, au lieu de chercher à optimiser des applications largement étudiées par la communauté (principalement basées sur la sécurité routière), ils essaient de couvrir un plus large éventail de service possible (sécurité, efficacité du trafic, services commerciaux, divertissement, etc) ainsi 34 cas d'utilisation sont testés (voir la figure 2.18).

SCORE@F. Le projet est similaire à SimTD mais en France. SCORE@F (Système Coopératif Routier Expérimental Français, 2010-2013) est mené par Renault avec 12 industriels partenaires et 7 laboratoires. Comme les autres projets, le but est de quantifier les bénéfices du V2X, d'identifier les acteurs, valider les standards et développer des applications. 30 véhicules sont utilisés pour les tests réels, les applications de coopération (alerte collision, alerte de risque potentiel), d'optimisation des intersections (échange avec les feux de circulation, vitesse recommandée) et d'optimisation des services aux véhicules électriques (points de charge) sont testés. PSA et Renault souhaitent déployer 2000 véhicules pour la suite du projet.

Co-Drive. Co-Drive est une initiative de l'équipementier Valeo s'étalant de 2010 à janvier 2014. C'est un système de conduite coopératif où la communication Véhicule à Infrastructure (V2I) est centrale. Le véhicule équipé du système Co-Drive est capable d'échanger via des unités de bords de route des informations avec un gestionnaire autoroutier. Les gains du projet ont permis une acquisition d'un savoir technique sur le développement de briques logicielles et

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

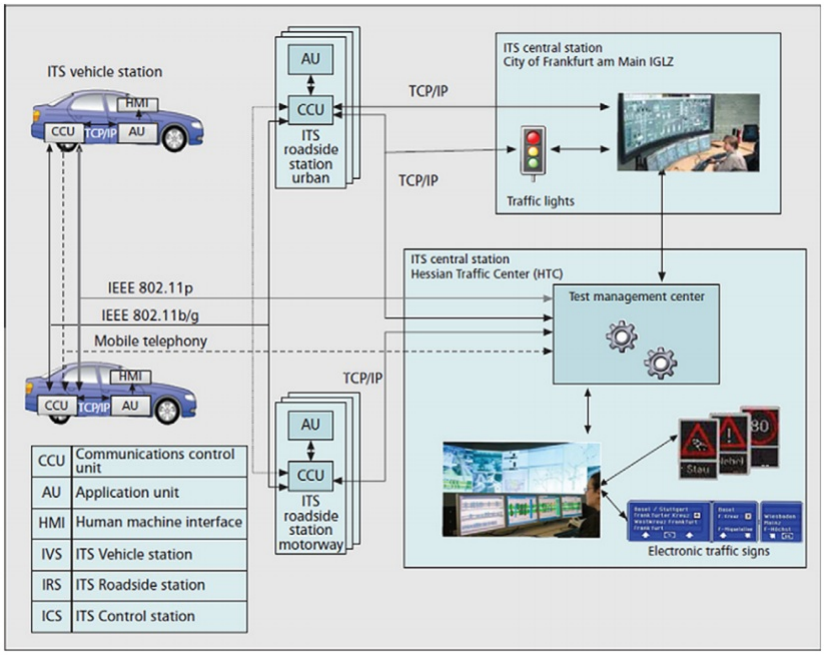

FIGURE 2.17 – Équipement du projet SimTD

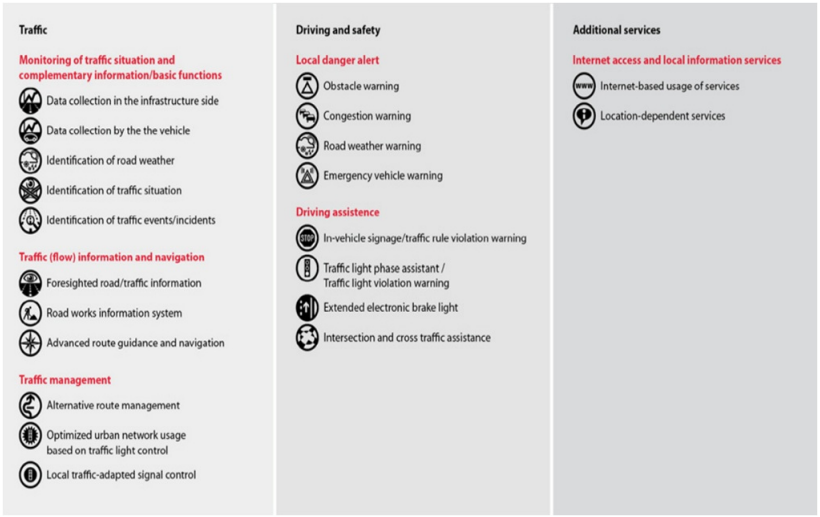

FIGURE 2.18 – Applications du projet SimTD

matérielles (normes actuellement standardisées de la communication véhiculaire) ainsi qu'un aperçu des services possibles (information trafic, avertissement rapide d'événement dynamique du réseau routier, etc).

Les partenaires sont Clemessy, APRR, Mediamobile, Sopemea, Comsis, Civitec, Tecris, Citilog, Navecom, Inria, IFSTTAR, INSA-Rouen et l'université de Versailles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

FOTsis. C'est un test à large échelle portant sur l'infrastructure routière nécessaire pour le déploiement des communications I2V, V2I, et I2I. Ce projet teste l'efficacité et le potentiel d'un tel déploiement sur les routes européennes. FOTsis teste différents services à travers des expérimentations dans toute l'Europe comme la gestion des situations d'urgence, la gestion de la sécurité autour d'un incident, la gestion de la congestion, l'assignement dynamique de trajet, le suivi de véhicules spéciaux et l'évaluation de la sécurité des infrastructures. L'objectif principal de FOTsis est de tester la capacité des infrastructures pour fournir ces différents services de coopération. Les partenaires de ce projet sont, entre autre, l'université Polytechnique de Madrid, l'université de Murcia, la fédération internationale de l'automobile.

Voici une liste non exhaustive des principaux projets et des tests réels autour des transports intelligents dans le monde.

Projet					
Noms	Logo	Description	Zone	Participants	Date
COMe-Safety		COMeSafety2 (Communication for eSafety 2) travaille la standardisation et les meilleures pratiques de l'Europe, du Japon et des Etats-Unis. Il travaille également sur les applications de cooperation pour la sécurité. Enfin l'architecture développée par COMeSafety a été utilisée dans le projet PRE-DRIVE C2X	EU	BMW (coordinateur), Daimler, Fiat, Renault, Volvo	Fini (12/2013)
PRE-DRIVE C2X (PREparation for DRIVing)		Le but est de déployer des outils de simulation pour estimer les bénéfices des ITS en terme de sécurité, efficacité et environnement. Ils ont developpé des outils nécessaires pour des essais sur le terrain de systèmes cooperatifs en suivant les normes ETSI TC.	EU	Delphi, Audi, BMW, université de Karlsruhe, Volkswagen, Institut National de Recherche sur les transports et leur sécurité, Hitachi Europe, NEC, l'université de Surrey, Volvo, etc	Fini (2008-2010)
Drive C2X		Drive C2X regroupe un ensemble de projet avec parmi eux des test réels avec les technologies 802.11p et UMTS pour l'échange des données entre les véhicules et l'environnement urbain.	EU	Daimler (coordinateur), Audi, BMW, Fiat, Ford, Honda, Opel, PSA, Renault, Volvo, Bosh, Continental, Delphi, Denso, Hitachi, NEC & Renesas, Traffic engineers : PTV (Planung Transport Verkehr), ERTICO ITS, EICT (Centre Européen de Technologies de l'Information et de la Communication)	Fini 2011-2013
CoCities		C'est un projet pilote pour introduire et valider les services de cooperation dans la ville et les zones urbaines	EU	Austriatech, Softeco Sismat, Telematix, Fluidtime, Ropid, Brimatech, Polis, Atos, PTV GROUP, MLC ITS, etc	Fini (12/2013)
COSMO		Le but est de mettre au point et d'exécuter des démonstrations pratiques d'une gamme de services V2V et V2I dans des conditions réalistes	EU	Volvo, Fiat	Fini (06/2013)
Smart-CEM		(Smart Connected Electro Mobility) est un projet visant à démontrer comment les technologies de la communication et de l'information (ICT) peuvent rendre la navigation des véhicules électriques plus pratiques et remédier aux lacunes qui leur sont associées	EU	MLC ITS, ERTICO, DLR, Bosch, NEC, PTV GROUP, etc	2012-
EuroFot		Des tests sur des fonctions ADAS pour assister les conducteurs dans la détection d'événements hasardeux (accidents)	EU	Ford, MAN, Volvo cars, Volvo Trucks, Volkswagen, Audi, Renault, Fiat, BMW, Daimler, Bosh, Continental, Delphi, HarmanAlcor, ERTICO, ADAS, EICT	Fini 2008-2012
FOT-Net		Tests à grande échelle sur l'efficacité, la qualité, la robustesse et l'acceptation des ITS. Les services visent à rendre les transports plus sûrs et pratiques.	EU	Daimler, Ford, Nissan, Orange, Continental, ERTICO, Ecole polytechnique de Chamlers, IKA, CTAG, l'université de Leeds, VTT	début en Janvier 2014 pour 36 mois
GeoNet		Le but de GeoNet était de mettre en oeuvre et tester officiellement les mécanismes de mise en réseau comme par exemple un module logiciel autonome qui pourraient être incorporé dans des systèmes coopératifs.	EU	INRIA, IMDEA-Networks, EFKON, Hitachi, NEC, Lesswire	Fini (01/2010)
Intersafe-2		Son but est de développer et démontrer le potentiel sécuritaire des intersections coopératives (CISS : Cooperative Intersection Safety System). Il montre une diminution de 80% des accidents aux intersections.	EU	BMW, Volskwagen	Fini (2011)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Oversee		Ce projet a pour but de contribuer à l'efficacité et la sécurité du transport routier en développant une plate-forme, qui fournira une communication sécurisée, standardisée et générique pour les applications dans le cadre des ITS.	EU	Escrypt, Trialog, Volkswagen, OpenTech, universités de Berlin, Fraunhofer, Valencia et de Siegen	Fini (06/2012)
TeleFOT		C'est le plus important projet CVIS au sein de l'organisation ERTICO. Leur but est d'évaluer la convivialité, la sécurité, l'efficacité et les impacts environnementaux des fonctions et des services de post-marché et des dispositifs de communication sur des véhicules. Mais aussi de prendre conscience du potentiel de ces appareils et accélérer leur adoption.	EU	BMW, Daimler, Renault, Volvo, Fiat, Magneti, Bosh, Navteq, Telecom Italy, Vodafone.	Fini (05/2012)
Intelli-Drive		Anciennement VII (Vehicle-Infrastructure Integration), ce projet se focalise sur la standardisation des communications véhiculaires. Le département des transport au USA ont développé et testé la bande 5.9GHz.	USA	Daimler, Volkswagen, Navteq, université de Californie, etc	Fini (2009)
DSSS		Driving Safety Support System est géré par l'UMTS du Japon et le NPA (National Police Agency). Il cherche des solutions de communication V2I pour les routes afin de prévenir les accidents de la circulation.	Japon	Honda	2009-2010
CVIS		Ce projet vise à développer les éléments clés pour tester et prouver la viabilité des systèmes V2V et V2I	EU	Fiat, Daimler, Renault, Volvo, Bosch, Siemens, Vodafone, Autoroutes du Sud de la France, BAE systems, CIT, Departement des transports, Efkon, ERTICO, FEHRL, INRIA, Intempora, Navteq	Fini (2010)
iTETRIS		Le projet FP7-UE iTETRIS développe une plate forme à grande échelle, intégrée avec la communication sans fil pour le management du trafic en temps réel. Des simulations à long terme d'applications de gestion de la circulation et de coopération sont testées. La plate-forme combine la simulation de la circulation et de la communication qui permet des analyses détaillées des effets et de la performance des applications coopératives sur les flux de trafic, les temps de déplacement, les émissions, etc.	EU	Hitachi, Thales, CBT, Innovalia, PEEK, Eurecom	
PRE-SERVE		"Preparing secure Vehicle-to-x communication systems", c'est un projet FP7-UE qui cherche à apporter une communication sécurisée et une vie privée protégée dans le cadres des ITS, il est proche de la réalité en fournissant et en testant sur le terrain des systèmes de sécurité et de confidentialité.	EU	Renault, Audi, BMW, Daimler, Volkswagen, Denso, Infineon, CAMP Consortium, SimTD, L'université de Twente, Escrypt, l'institut de technologie de l'information sécurisée de Fraunhofer (SIT)	
AIM		"Autonomous Intersection Management" permet de contrôler des intersections avec des véhicules autonomes afin d'améliorer la sécurité et l'efficacité	USA	Learning Agents Research Group de l'université du Texas à Austin	
SKY		"Start ITS from Kanagawa Yokohama" est un projet dont le but est de réduire la congestion et les accidents	Japon	Nissa, Panasonic, Xanavi Informatique, NTT DoCoMo	
EVITA		Les objectifs du projet sont de concevoir, de vérifier des prototypes de système à bord des véhicules communicants où les composants relevant de la sécurité sont protégés contre la falsification et les données sensibles sont protégées contre la compromission.	EU	BMW, Bosh, Continental, Siemens, SIT Fraunhofer, Escrypt, EURECOM, Infineon, MIRA, Trialog, Fujitsu	Fini
PRE-VENT		"PReVENTive and Active Safety Applications" vise à développer, tester et évaluer les applications liées à la sécurité à l'aide de dispositifs avancés de détection et de communication intégrés dans les systèmes de bord.	EU	DaimlerChrysler AG, BMW, FIAT, Ford, PSA, SAGEM, Volvo, Audi, Renault, Volkswagen, CERTH-HIT, des instituts de recherches dont : CNRS, Fraunhofer-IVI, INRIA, ICCS, LCPC, des universités de Lund, de Chemnitz, de Parma, de Trento, de Hannover, VTT,Bosch, Delphi, Delco Electronics, Siemens, Navteq, Philips, etc	Fini
Safespot		"SEcure VEhicle COmmunication", est un projet qui se concentre syr la définition exacte et l'implémentation des requis de sécurité pour les réseaux véhiculaires	EU	Fiat, Daimler, l'université de Budapest, l'école polytechnique de Lausanne, l'université catholique de Louvain, Bosch, etc	Fini
AMAS		Autonomous Mobility Applique System, représente des capteurs et des systèmes de contrôle sur les véhicules militaires pour permettre des fonctionnalités d'assistance au conducteur ou le fonctionnement automatisé du véhicule mais à faible coût	USA		

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

City-Mobil2	CityMobil2	CityMobil2 est un projet pilote visant à automatiser les systèmes de transport publique. Des véhicules électriques automatisés (sans chauffeur) fabriqués par la société française Robosoft sont équipés d'un système de radars, d'ultrasons et de cartographie de l'environnement, ceci permet au véhicule de repérer les obstacles sur un circuit programmé et de s'arrêter au moindre aléa de la circulation.	EU	Inria, universités de Rome, de Leeds et de Southampton, POLIS (Villes et régions européennes pour des solutions de transport innovantes), ISIS IT, DLR (centre aérospatial allemand), ERTICO, VisLab, GEA (groupe d'études en aménagement, Vallotton et Chanard)	2014-2015
Arizona E-VII Program	E-VII Arizona's Emergency VII Program	Ce projet est composé de deux projets l'un pour démontrer des concepts et faire des essais opérationnels, l'autre pour le routage dynamique avec la gestion des incidents.	USA	Federal Highway Administration, Arizona Transportation, université d'Arizona, etc	(2008-2009)
Mn Pass	MnPASS	Ce projet est conçu pour percevoir une taxe pour des Voyages rapides (moins encombrés), sans la nécessité que l'ensemble de la route soit désignée comme une route à péage.	USA		
Instant Mobility Project	Instant Mobility	Il vise à amener internet et la connectivité dans tous les transports et la mobilité en général	EU	VTT, TNO, Valeo, Volvo, Pertimm, Telecom Italia, Telefonica, Statens Vegvesen, la ville de Nice, Swarco, Navteq, Isbak, Ifsttar, Orange, DLR, DHL, ERTICO, CEA LIST, ATAC SpA, Thales	Fini (2013)
AKTIV	aktiv	"Adaptive and Cooperative Technologies for Intelligent Traffic", ce projet soutenu par 29 partenaires souhaite développer un système d'assistance dans les véhicules coopératifs (CoCar Project), prévenir les accidents grâce aux systèmes de gestion intelligente du trafic et les technologies de communication mobile pour véhicules connectés	DE	Opel, Audi, BMW, Volkswagen, Ford, Continental, Bosch, Siemens, Ericsson, Ibéo, Allianz, TeleAtlas, Transver, Vodafone	Fini (2006-2010)
HAVEit	HAVEit	"Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport" est un projet concentré sur les véhicules automatisés et qui explore l'intéraction entre l'utilisateur et le véhicule selon le degré d'automatisation.	EU	Volvo, Volkswagen, Continental, DLR, Hadlex	Fini, juin 2011
KONVOI	KONVOI	Ce projet est concentré sur les ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) pour former des peletons de camion jusqu'à quatre véhicules sur des routes publiques. Ceci améliore la fluidité du trafic, la consommation du carburant et les performances environnementales des poids lourds.	DE	ika, IfP, IRT, isac, BUR, ZLW/IMA, MAN, WABCO, BASt	Fini (2005-2009)
CCC	CCC Connected Cruise Control project	"Connected Cruise Control" qui se traduit par une solution intégrée pour l'aide à la conduite au niveau de la vitesse afin que les conducteurs puissent progresser et éviter la congestion. La technologie intègre des unités de communciation à l'intérieur du véhicule et en bord de route pour améliorer la fluidité de la circulation	EU	l'université de technologie de Delft, Nokia, NXP, l'université de Twente, Technolution, TNO, CLIFFORD	Fini (03/2013)
COOPERS	coopers	"Cooperative Systems for Intelligent Road Safety" se concentre sur le développement des applications télématiques innovantes sur l'infrastructure routière avec l'objectif à long terme d'une "gestion du trafic coopérative" entre le véhicule et l'infrastructure, et il vise à réduire l'écart entre le développement des applications télématiques entre l'industrie et les opérateurs d'infrastructure.	UE	BMW, Efkon, Fraunhofer, Navteq, TFH	2006-2011

(Voir [31] pour un état de l'art détaillé sur les projets V2V, V2I dans le monde)

2.1.3.2 Projets futuristes : V2X

iimo

Diji = Fun Vii = iimo (Toyota). C'est une voiture personnalisable avec un écran sur tout l'extérieur de la voiture [110]. L'utilisateur peut changer l'image via son smartphone ou sa tablette. Il peut aussi localiser ses amis sur la carte qui s'affiche sur cet écran. Dans la voiture, le tableau de bord et le sol ne représentent qu'un seul et même écran. Un affichage tête haute affiche la température, les mails, la météo, la carte, le diagnostique du véhicule. Une mise à jour régulière et personnalisable est disponible. Une vie sociale virtuelle avec des jeux est possible avec les autres voitures, ainsi un auto-pilote est nécessaire. Enfin un hologramme peut guider le conducteur vers ses points d'intérêt. La communication entre les véhicules sert également la sécurité (éviter les accidents).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Visteon e-Bee Ce concept a été présenté à l'Electronica 2012 Trade Show à Munich [116]. Une application autorise les utilisateurs à partager leurs voitures à distance dans le monde et à la contrôler à distance. Un autre service permet de faire du shopping seulement en passant devant un panneau publicitaire (la commande est livrée dans le coffre du véhicule). Une personnalisation du véhicule est possible avec par exemple une diffusion d'un parfum, ou un accès à l'agenda personnel du conducteur. Une détection des véhicules d'urgence est aussi pensée.

Le projet Aeon Le projet Aeon par Michael Harboun et Dassault Systems a obtenu le premier prix des 'Imagine Awards For Best Design and Communication 2011'. Ils ont imaginé le véhicule du futur avec différentes fonctions comme deux modes de conduite : manuelle et automatique, une interaction avec les contacts sociaux, un accès aux informations de la région (tourisme), tout ceci diffusé sur un écran en 3D (réalité augmentée).

Future Urban Personal Mobility (Audi). Audi, l'Institut Royal Technologique de Melbourne (RMIT) et le laboratoire de l'université du jeu et de l'expérimentation du divertissement : GEElab (créé en 2011) travaillent ensemble sur la mobilité personnalisée du futur, l'environnement urbain et le rôle d'internet dans ces deux thèmes [120]. Ils ont présenté des nouveaux services pour le véhicule comme des jeux holographiques en 3D pour les enfants sur l'environnement autour de la voiture, avec une interaction par les gestes. Ils ont aussi pensé des applications de flirt entre voitures, ou encore une transformation holographique du siège arrière en bureau de travail. Ils ont également imaginé une application qui apprend les préférences de voyage du conducteur et une application pour trouver rapidement ses amis. Le système donne aussi la possibilité au conducteur d'avoir une conduite sportive (selon des crédits disponibles). Les informations de batterie et d'humeur du conducteur peuvent s'afficher sur l'extérieur de la voiture et sa couleur peut changer. Le plus intéressant dans leur projet est qu'ils voient la ville comme un réseau de noeuds connectés.

FIGURE 2.19 – Applications imaginées par Audi et GEELab : la ville est un réseau

'DICE', Dynamic Intuitive Control Experience (Mercedes). Mercedes présenta au CES 2012, un concept car planifié pour 2022 [87]. Leur idée est d'introduire la réalité augmentée

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

dans le véhicule afin d'amener le réseau sociale et le web de manière dynamique. La technologie de leur système permet de contrôler les fonctionnalités de manière intuitive avec de simples gestes de la main (comme la Kinect de la Xbox360 de Microsoft). Leur volonté est que les applications doivent être accessibles par les main et les yeux (écran tactile, affichage tête haute, détection des gestes). Le conducteur peut par exemple avoir accès à la carte de la ville sur le pare brise avec la position géographique reportée par ses amis sur le réseau sociale. Une photo des amis est également projetée sur le pare brise quand le véhicule est proche de l'habitation de ce dernier. Il peut également voir les statuts des autres utilisateurs de DICE. Les points d'intérêts relatifs au conducteur (restaurant préféré, hôtel, information historique des bâtiments) s'affichent également. Le conducteur peut recevoir et sauver de la musique jouée dans un Bar ou un Club lorsqu'il passe devant avec sa voiture, de même que les menus des restaurants. Enfin les messages du conducteur sont affichés et toutes les informations ci-dessus peuvent être lues par le système pour ne pas divertir le conducteur. Tout est fait de manière intuitive : le conducteur passe devant un bar et d'un simple geste, la musique jouée dans ce dernier est diffusée dans sa voiture.

2.1.4 Classification et discussion

En suivant la classification présentée dans la section 2.1, nous sommes en mesure de classer ces projets en fonction de la complexité des applications qui les compose. L'état de l'art représente des briques simples de chaque vue décrite dans la section 2.1 : vue centrée véhicule, vue centrée réseau, vue centrée utilisateur. La figure 2.20 les classe selon leur vue et leur complexité.

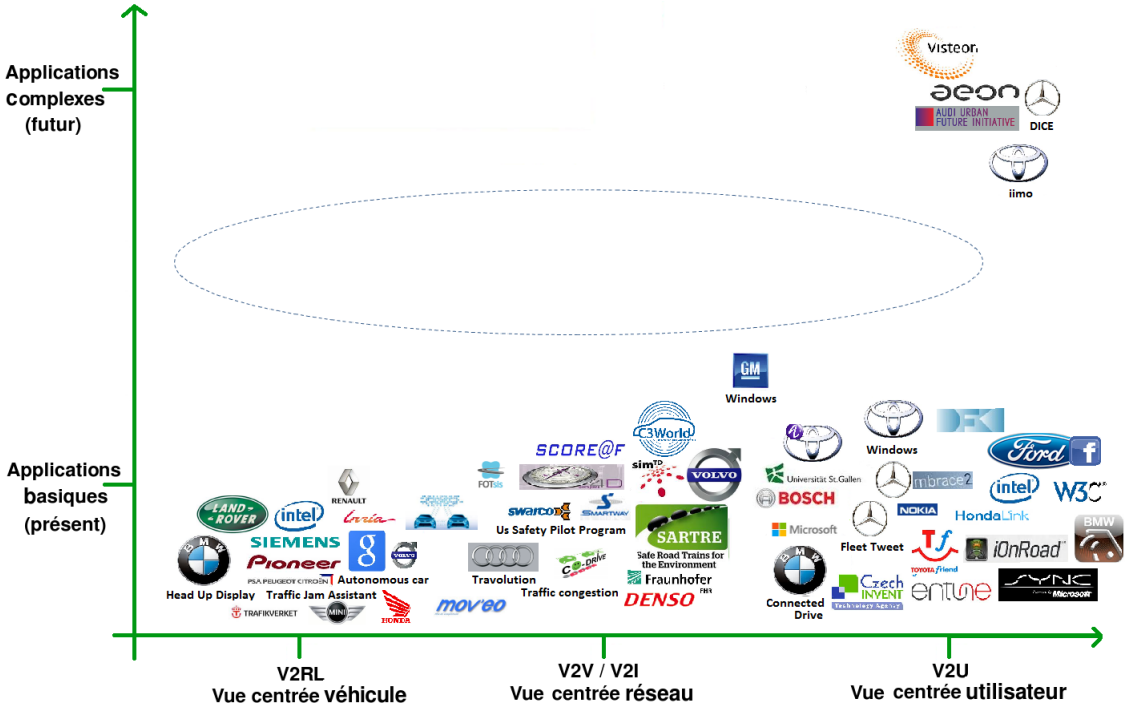

FIGURE 2.20 – Classement des applications selon leur complexité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Certains projets se focalisent uniquement sur le véhicule en lui même sans considérer les autres véhicules de l'environnement ou le conducteur comme les systèmes d'assistance à la navigation avec affichage tête haute (BMW, Pioneer, Intel, Siemens, etc). Ils utilisent les briques de détection de vitesse, de panneau, de distance de sécurité, de ligne, etc. iOnRoad utilise la brique de détection de distance mais avec une connexion originale avec l'utilisateur c'est pourquoi il se trouve proche de la vue centrée utilisateur. Les voitures autonomes comme celle de Google ou les assistants de conduite autonome comme BMW, Ford, Volkswagen, GM ou Audi captent l'environnement seulement avec des outils visant à remplacer l'oeil de l'être humain, tels que des caméras ou des radars, il n'y a pas d'échanges avec l'environnement, ainsi des briques de détection sont utilisées. D'autres comme Peugeot et Citroën proposent des recherches pertinentes sur le web mais exclusivement pour le véhicule (parking, navigation, etc). Les applications sont concentrées autour du véhicule et/ou liées directement à l'environnement proche sans échange avec ce dernier. La plupart sont déjà sur le marché, elles permettent entre autre d'intégrer petit à petit une intelligence au véhicule. Cependant elles restent basiques en rapportant seulement des informations sans les interpréter.

Les applications produisant des échanges avec l'environnement sont des projets, pour la plupart, avec des tests sur terrain (FOT) comme SimTD en Allemagne, le projet "Connected Vehicule Safety Pilot Program" aux Etats-Unis, Score@f en France, ConnectSafe, Compass4D, Swarco, etc. SARTRE utilise des briques de coordination de vitesse ainsi que l'infrastructure, Swarco interagit avec les feux de circulation, Denso utilise la communication pour la détection des véhicules d'urgence, SmartWay développe des idées autour du potentiel V2V ainsi que C3World avec un aspect plus tourné vers la recherche. Ils concentrent tous leurs idées sur l'aspect réseau de manière à montrer tous les impacts positifs des transports communicants sur la sécurité et l'environnement. Leurs applications sont basiques de manière à les développer dans un environnement réel et obtenir des résultats concrets afin de convaincre les gouvernements de l'enjeu et de l'utilité d'un tel déploiement dans les villes.

Enfin les applications faisant intervenir le conducteur relèvent d'avantage du divertissement avec des connections au Web (Sync de Ford, Entune de Toyota, HondaLink, Intel, Ford et Facebook, Mbrace2 de BMW) ou l'environnement comme Mercedes TweetFleet (places libres communiquées sur Twitter), Toyota Friend (connexion avec la concession), Alcatel (connexion avec la maison), DFKI (tourisme), Projet Detroit de Microsoft (message sur le pare brise), Bosch IOT (tourisme), Toyota Windows (fenêtre interactive) que d'interactions avec les autres usagers de transports connectés ou d'aspects sociaux liés au transport (préférence de trajet en fonction des aspects sociaux de l'usager par exemple). De plus beaucoup de ces services sont fortement liés à ceux du téléphone qui lui est centré sur l'utilisateur. Un exemple différent est "General Motor Windows" qui peut être classé proche de la vue centrée réseau car il y a un échange avec les autres utilisateurs (partage de fenêtres). Cependant, dans toutes ces applications citées, il y a une volonté d'intégrer l'aspect social dans l'environnement véhiculaire, ces projets centrés sur l'utilisateur commencent à créer un lien entre le véhicule, l'environnement et l'utilisateur, mais certains d'entre eux ne sont que des prototypes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Les projets où ces trois vues sont connectées sont des projets futuristes comme Aeon et Visteon par exemple, où les clés du transport du futur sont représentées, en effet il existe dans ces projets une connexion sans interruption entre le véhicule, l'environnement, et l'utilisateur, sans séparation entre ces trois entités.

Cependant il a un écart considérable entre :

- le transport intelligent du futur capable de se connecter avec l'environnement de manière complètement autonome afin d'optimiser le temps de transport, la consommation, le temps d'attente, etc, et où le conducteur, qui n'en est plus un, peut s'adonner à d'autres occupations que celle de conduire.
- et le véhicule d'aujourd'hui capable de capter son environnement proche et de le retranscrire tel quel dans le véhicule.

Des applications ITS de transition sont nécessaires en prenant en compte les conditions actuelles de l'environnement urbain : - connexions imparfaites - véhicules non équipés au milieu de véhicules équipés - réaction du conducteur et intégration de ce dernier dans la décision du véhicule - environnement urbain complexe - coopération des véhicules pour un gain commun mais aussi individuel - dynamisme de l'information dans l'environnement urbain (temps réel très important mais difficile à traiter) - quantité de données qui transite - coût de l'équipement - etc ; en somme, tous les défis que nous avons cités dans la section 1. Le but ce cette thèse est de proposer des services et des applications dans le contexte des VANETs en prenant en compte ces difficultés que ce soit par rapport aux données en elles-mêmes, aux équipements disponibles ou aux informations disponibles, tout ceci à des échelles différentes, allant du plus petit permettant des tests réels (un feu de circulation) au plus grand avec des simulations (une ville).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 3

Méthodologie : de la petite échelle à la grande échelle ; du réel à la simulation.

Ce chapitre est dédié aux différentes échelles que nous utiliserons pour présenter et tester nos services véhiculaires, la petite, la moyenne et la large échelle, chacune possède ses avantages propres. Une petite échelle permettra des tests sur le terrain sur la performance de la communication véhiculaire que nous pourrons implémenter facilement en simulation. Ainsi nous décrirons un exemple de FOT, comme ceux présentés dans l'état de l'art, et nous testerons son interopérabilité avec un autre FOT européen, afin de valider sa cohérence. Nous utiliserons ensuite les paramètres dans le contexte de la simulation. Nous montrerons ainsi la similitude entre des tests réels et simulés d'un service de fluidification du trafic à un feu de circulation. Nous verrons à travers la comparaison des données réelles et de simulation qu'une validation du modèle de simulation à cette échelle est possible. La moyenne échelle décrit un rond-point complexe et montre la difficulté ajoutée par cette échelle plus grande. L'investigation nécessaire pour simuler ce rond-point avec des données réelles sera ainsi montrée. De plus nous verrons que les modèles classiques utilisés en simulation ne sont pas toujours valides selon la configuration considérée. Enfin la dernière échelle est celle d'une ville. La moyenne échelle souligne la quantité de travail pour traiter des données brutes et réelles, une échelle plus grande demande donc une investigation encore plus conséquente. Ainsi les traces à large échelle disponibles sont peu fréquentes, à cause de leur coût mais aussi de la difficulté de les obtenir et de les traiter. Cette dernière section sur la large échelle n'apporte donc pas de contribution mais décrit les traces existantes à large échelle. Nous nous focaliserons en particulier sur celle de la ville de Cologne.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

3.1 Petite échelle

La petite échelle permet de réaliser des tests réels sur la communication véhiculaire, ainsi dans cette section nous verrons trois tests réalisés en conditions réelles. Le premier test nous permet d'évaluer les performances de communication IEEE 802.11p entre des véhicules et l'infrastructure en conditions réelles, le deuxième montre l'interopérabilité entre un projet français Co-Drive et un projet européen FOTsis (voir les paragraphes 2.1.3.1 et 2.1.3.1 du chapitre 2 pour les détails sur ces deux projets). Ces tests permettent de valider une plate-forme que nous utilisons par la suite pour un troisième test : celui d'une application concrète utilisant la communication V2I à un feu de circulation. Nous comparerons ainsi la simulation de ce service et les tests réels, ce qui validera le modèle de simulation.

3.1.1 Deux véhicules sur l'autoroute A41

Dans cette section, nous présentons un Field Operational Test afin de montrer comment se déroule ce genre de test en grandeur nature ainsi que les contraintes que cela peut engendrer (afin de valider des applications, les FOTs mis en place doivent être basiques). Ces tests nous permettent également d'avoir des résultats concrets sur la communication V2I et I2V dans des conditions réelles. Ces essais ont été réalisés dans le cadre du projet Co-Drive.

Les normes ETSI sont respectées avec l'utilisation des messages CAM (Cooperative Awareness Basic Service, ETSI TS 102 637-2 V1.2.1) et DENM (Decentralized Environmental Notification Basic Service, ETSI TS 102 637-3 V1.1.1). Des messages CODM (Co-Drive Message) sont créés pour le projet. La structure ASN.1, les protocoles IPv6, UDP et les diffusions unicast sont également utilisés. Les normes sont étudiées et appliquées dans un soucis d'interopérabilité avec les autres projets européens tels que SCORE@f (il ne manquait que GeoNet/BTP pour être interopérable avec ce projet) et FOTsis (voir la section 3.1.2). Les partenaires des essais sont : Citilog (fournisseur des unités de bords de route), Médiamobile (opérateur d'information routière), APRR, AREA, INSA Rouen, IFSTTAR, Clemessy (Comsis) et Valeo.

3.1.1.1 Contexte des essais

Ces essais ont pour but de valider le fonctionnement du prototype complet du système Co-Drive dans des conditions réelles et vérifier la boucle véhicule-centre de contrôle du trafic-unité de bord de route. Ceci afin de pouvoir utiliser Co-Drive dans des tests de service véhiculaire en conditions réelles et étendre à la simulation avec des paramètres ajustés correctement.

Lieu

Des premiers essais sur les pistes de Satory ont permis de montrer la viabilité du système Co-Drive. Ainsi des essais en conditions réelles plus poussés (liés aux applications de Co-Drive) ont été menés sur l'Autoroute A41 dans les deux sens de circulation : Chambéry ⇔ Grenoble (figure 3.1).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

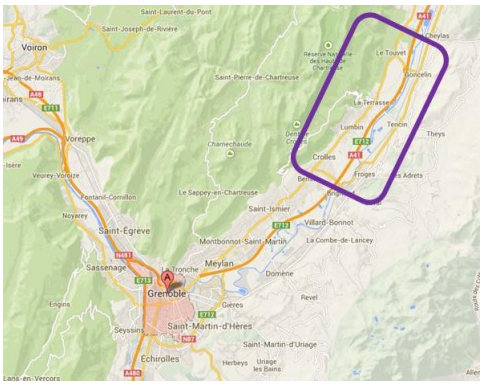

FIGURE 3.1 – Essais sur l'autoroute A41 entre les échangeurs de Crolles et de Touvet (38)

Équipement

La figure 3.2 représente le système en entier spécifique aux essais. Un système intelligent embarqué dans le véhicule, appelé OBU (On Board Unit), constitué d'un smartphone, d'une caméra wifi et d'un routeur wifi, permet de capter et diffuser les données du véhicule vers un calculateur (le Sageri) via une unité de bord de route appelée borne RSU (Road Side Unit). Ce calculateur reçoit également des données de positionnement pré-traitées par Mediamobile (PC routier sur le site d'Ivry (94)). Ce dernier élabore des temps de parcours sur la base des données véhiculaires, et recueille des informations véhiculaires présentant un intérêt pour la gestion du trafic. Le calculateur Sageri dialogue également avec le PC autoroutier Cesar II d'AREA pour l'expérimentation. Il est capable de renvoyer de l'information ciblée vers les véhicules via les bornes V2X. Deux antennes sont fixées sur le PMV (Panneau à Messages Variables) et couvrent les deux sens de circulation, la caméra XCam est orientée sur les voies de circulation. Sur la borne RSU, le PC Valeo et le PC Citilog sont branchés sur le même switch pour capturer les mêmes paquets provenant du véhicule.

Concrètement des messages CAM-DENM-CODM sont envoyés de l'OBU vers le RSU en 802.11p sur le canal 176 (5.88 GHz). Des messages (travaux ou véhicule d'intervention) sont envoyés par le Cesar APRR vers le RSU qui les transmet à l'OBU. Les temps de parcours et des données du trafic sont enregistrés et envoyés par le serveur MediaMobile en 3G à l'OBU. Enfin les Mimokits permettant la communication 802.11p, sont fixés à leur puissance d'émission maximale. Le tableau 3.1.1.1 résume le matériel et les conditions des tests réalisés. Deux véhicules sont utilisés pour les tests, une Audi et un Renault espace.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

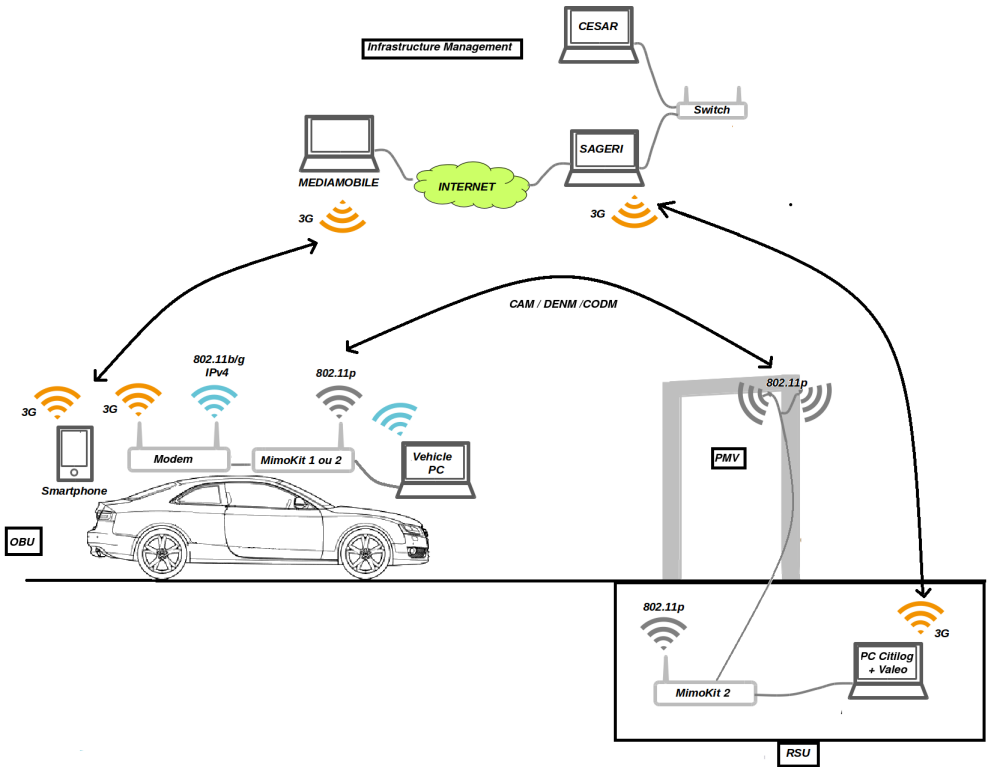

FIGURE 3.2 – Système des essais en entier

Lieu	Autoroute A41, aire de CHONAS	
Météo	Pluie et Neige	
Durée	Deux jours 20 et 21 Novembre 2013	
Materiel	Audi A5 (Valeo) Mimokit 2 : 802.11p + GateWay IPv4-IPv6 Antenne Magnétique MOBIL MARK MGW 303 Routeur 3G Smartphone Android (Galaxy S4) Camera Wifi Valeo Convertisseur 12V-220V	Renault Esapace (IFSTTAR) Mimokit 1 idem Routeur Smartphone Android (Galaxy S2)
Borne	Mimokit 2, PC Citilog, PC Valeo (pour archiver les messages reçus), Switch, Deux antennes de bord de route montées sur PMV, Modem 3G, Caméra XCam Citilog montée sur PMV	

TABLE 3.1 – Matériel utilisé

3.1.1.2 Les essais en conditions réelles

L'Audi A5 effectue le sens Chambéry → Grenoble sur la voie la plus éloignée en distance du RSU. Une pluie forte est présente. Avec une vitesse de 110 km/h, 7 messages CAM et 6 messages CODM sont reçus sur une distance de 150 m environ. Les messages sont donc reçus et décodés correctement dans des conditions météorologiques défavorables (forte pluie et voie la plus éloignée).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans le deuxième essai, l'Audi A5 roule dans les deux sens : Chambéry ⇔ Grenoble. Les résultats obtenus sont équivalent au premier essai pour le sens (Chambéry → Grenoble), avec une hausse des messages reçus à plus faible vitesse. Une augmentation est notée dans le sens Grenoble → Chambéry, en effet le véhicule est plus proche de la borne RSU. La portée mesurée d'après les coordonnées GPS incluses dans les messages, est de 150 mètres.

Sens	Vitesse	CAM	CODM Mesure
Chambéry → Grenoble	120.24	7	9
Grenoble ← Chambéry	107.60	38	38
Chambéry → Grenoble	107.60	11	10

TABLE 3.2 – Résultats du deuxième essai.

Dans le troisième essai, l'Audi A5 roule dans les deux sens avec le Mimokit 2 et la Renault espace roule dans les deux sens avec le Mimokit 1. Les véhicules se suivent et peuvent passer en même temps devant la borne. La neige étant tombée en abondance, nous ne l'avons pas retirée des antennes RSU de façon à tester le système dans des conditions réelles (figure 3.3). La transmission des données s'est effectuée entre le véhicule et la borne, malgré la neige. Les données émises par les deux véhicules sont reçues par le RSU même lorsqu'ils sont tous les deux à portée au même moment.

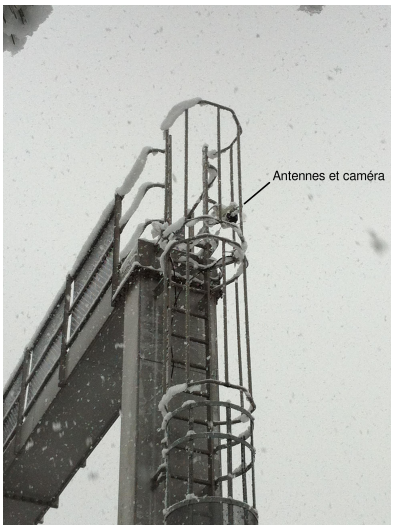

FIGURE 3.3 – Neige sur les antennes

Sens	Vitesse	CAM	DENM	CODM Alerte	CODM Mesure	CODM Total	Total
Chambéry → Grenoble	88.20	15	0	0	13	13	28
Grenoble → Chambéry	102.60	64	0	42	63	105	169
Chambéry → Grenoble	95.90	11	8	12	7	19	38
Chambéry → Grenoble	87.80	18	19	27	19	46	83

TABLE 3.3 – Résultats du troisième essai

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Avec les deux véhicules, les résultats en termes de messages reçus sont globalement le double par rapport aux essais précédents. Ceci montre l'équivalence en terme de performance entre le Mimokit 1 et le Mimokit 2 en émission. La portée mesurée d'après les coordonnées GPS incluses dans les messages est toujours d'environ 150 mètres. Des messages générés par le Cesar ont été reçus dans les deux véhicules, un peu plus dans l'Audi équipé du Mimokit 2 que dans la Renault équipée du Mimokit 1.

Suite à des problèmes de boot sur le Mimokit 2, nous remplaçons le Mimokit 2 du RSU par un Mimokit 1. Nous utilisons qu'une seule voiture, la Renault dans les deux sens de circulation. Aucun message n'a été reçu dans le sens Chambéry → Grenoble, le MK1 est donc moins performant que le MK2. Environ 24 messages (6 de chaque type) ont été reçus dans l'autre sens. La portée mesurée est cette fois de 50 mètres, ce qui est faible. Enfin des messages générés par le Cesar ont été reçus dans le véhicule.

Dans le dernier essai, nous faisons passer l'Audi A5 équipée d'un MK2 dans les deux sens, la neige limite alors la vitesse à 90 km/h. Aucun message n'a été reçu dans le sens Chambéry → Grenoble, alors que c'était le cas avec un MK2 dans le RSU. Des messages ont été reçus dans le sens Grenoble → Chambéry : environ 28 de chaque type, soit 84 messages (DENM non activé). La portée, mesurée d'après les coordonnées GPS incluses dans les messages, est de 80 mètres. Les messages générés par le Cesar ont été reçus dans le véhicule.

3.1.1.3 Résultats

Pendant toute la durée des essais, des messages V2I passant par la 3G ont été envoyés au service info trafic avec succès, permettant de suivre en direct les essais sur site depuis le PC chez MediaMobile. Cependant des difficultés de connexion entre la borne RSU et le Sageri ont été constatées, notamment à cause du renouvellement aléatoire de l'adresse IP de la borne, en connexion 3G. Faute de temps (à cause des conditions exceptionnelles au niveau de la météo) pour plus d'essais, la transmission de photos d'alerte en 802.11p n'a pu être faite.

Concernant le 802.11p, les voies de circulation les plus éloignées de la borne n'ont pas permis de transmission de données dans les configurations les plus dégradées. Le rayon de communication varie ainsi de 50 mètres dans des mauvaises conditions (matérielles et météorologiques) à 150 mètres. Ces essais ont montré la réussite de transmissions de données entre une borne et deux véhicules passant en même temps devant celle-ci. Les applications embarquées sur le véhicule : détection de panneaux et inter-distance véhiculaire, étaient fonctionnelles et alimentaient les données transmises (802.11p, 3G). Ainsi Co-drive a montré son bon fonctionnement dans ces mauvaises conditions météorologiques.

3.1.1.4 Conclusion

Contrairement à d'autres essais sur piste cherchant seulement à quantifier des portées ou dénombrer les messages reçus, ces essais sur site avaient aussi pour objectif de vérifier le bon fonctionnement du système complet, afin d'appréhender un déploiement. Ils permettront

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

également d'avoir des paramètres de simulation correspondant à la réalité du terrain. Voici un résumé des validations effectuées durant les tests :

- Fonctionnement des services : Validé
- Transmission de messages V2I et I2V via 802.11p : Validé
- Transmission de données du Cesar au véhicule via 3G : Validé
- Essais dans des conditions inédites (pluie, neige, deux véhicules) : Validé
- Boucle OBU-RSU-Gestion du trafic : Validé

Nous utiliserons ces validations dans un test réel sur le terrain d'un service V2I entre un véhicule et un feu de circulation (voir section 3.1.3). Une simulation de ce même scénario suivra et montrera la similitude entre le réel et le modèle de simulation au niveau du comportement du véhicule (vitesse et rejet en CO2). Mais avant, après cette première validation du système Co-Drive en conditions réelles, nous testons maintenant son interopérabilité avec un autre projet européen nommé FOTsis. Ceci permet de valider et de crédibiliser complètement le projet : l'interopérabilité étant essentielle dans les instituts de normalisation.

3.1.2 Interopérabilité avec FOTsis

FOTsis (voir le paragraphe 2.1.3.1 du chapitre précédent) fait parti du 7ème programme-cadre de recherche et développement qui est un instrument communautaire de financement de la recherche et de l'innovation en Europe. Cette section décrit les scénarios et les résultats obtenus dans le cadre d'une collaboration entre le projet français Co-Drive et le projet FOTsis. Cet effort provient d'un encouragement de la commission européenne pour l'interopérabilité entre les architectures des différents projets européens FOT. ETSI TC ITS a travaillé sur la définition de l'interopérabilité dans les standards V2X. Les messages CAM et DENM sont deux exemples de cet effort de standardisation. Les personnes impliquées dans ce projet sont Pedro J.Fernandez, Fernando Bernal et Antonio Moragon de l'université de Murcia en Espagne ; Asier Hermosilla et Emilio Cacheiro de OHLC (gestion des routes en Espagne) et Philippe Gougeon, Alexandre Garnault et moi même de Valeo.

3.1.2.1 Contexte des essais

Chaque projet doit être capable d'envoyer, de recevoir et décoder les messages générés par l'autre projet. Au niveau de la couche physique, la technologie de communication utilisée dans les deux projets doit être la même et l'équipement hardware doit être compatible.

Lieu

Les tests sont en conditions réelles, ils ont été mis en place sur l'autoroute M-12 de l'aéroport de Madrid Barajas en Espagne (figure 3.4). Le centre de contrôle de l'autoroute est situé à Baraja, à côté du terminal T4 de l'aéroport.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

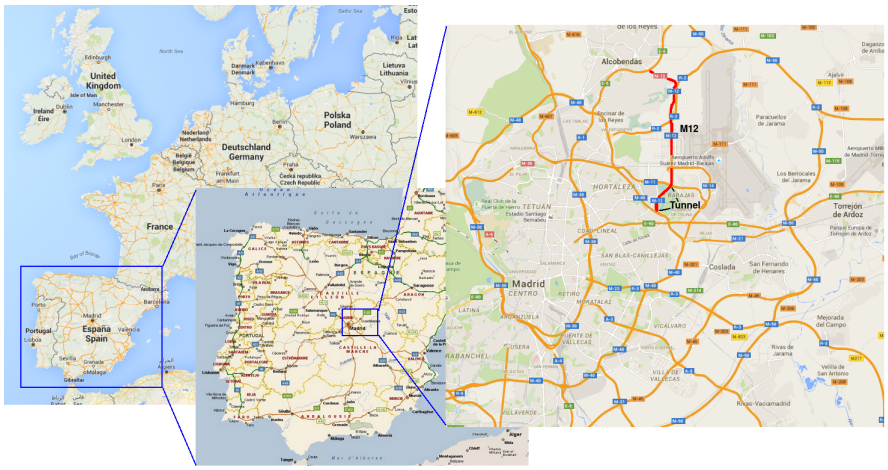

FIGURE 3.4 – Autoroute M-12 en Espagne

La figure 3.5 montre la topologie exacte du site des tests. Le carré rouge désigne la position du RSU sur le toit du centre de contrôle du trafic. Trois routes ont été utilisées, du Nord au Sud, proches du RSU (à 30 mètres), du Nord au Sud à 70 mètres, et enfin du Sud au Nord à 100 mètres.

FIGURE 3.5 – Vue zoomée sur le site de test de l'autoroute M-12

Afin de montrer le parcours, un exemple de test est montré dans la figure suivante 3.6. La ligne rouge représente le trajet du véhicule quant aux points bleus, ils correspondent à la couverture du 802.11p.

Équipement

Voici l'équipement utilisé venant de Co-Drive :

- COMSIS Mimokit 2 pour le 802.11p dans le véhicule (avec IPv6-IPv4)
- MOBIL MARK MGW 303 3C 3C 2C comme antenne du véhicule
- un routeur pour le véhicule : D-LINK DWR 512

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

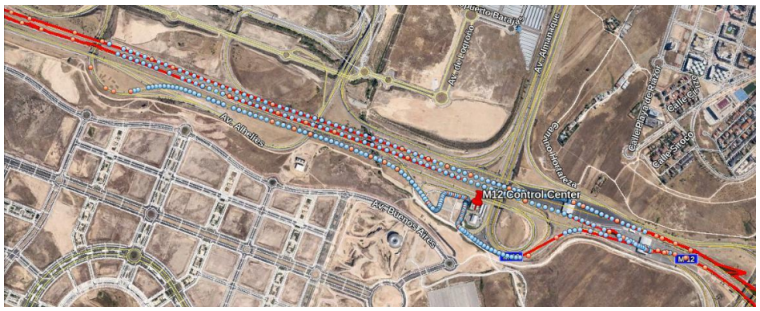

FIGURE 3.6 – Parcours du véhicule

- un Smartphone Samsung Galaxy avec les services Co-Drive

et voici celui provenant de FOTsis :

- COMMSIGNIA LAGUNA LGN-00-11 pour le 802.11p du RSU
- une antenne de bord de route : CW-G5WA570D12
- Software pour les messages CAM et DENM
- ITSSv6 firmware

La figure 3.7 montre les paramètres réseaux utilisés sur les tests. Un véhicule nommé VR1 est équipé d'un appareil 802.11p. Un RSU est donc installé à l'extérieur du bâtiment du contrôle du trafic routier juste à côté du site de test. Le router fournit une adresse IPv6 à l'intérieur du véhicule et une autre pour l'interface 3G. 'EUI64' signifie qu'une partie de l'adresse est générée par l'interface MAC.

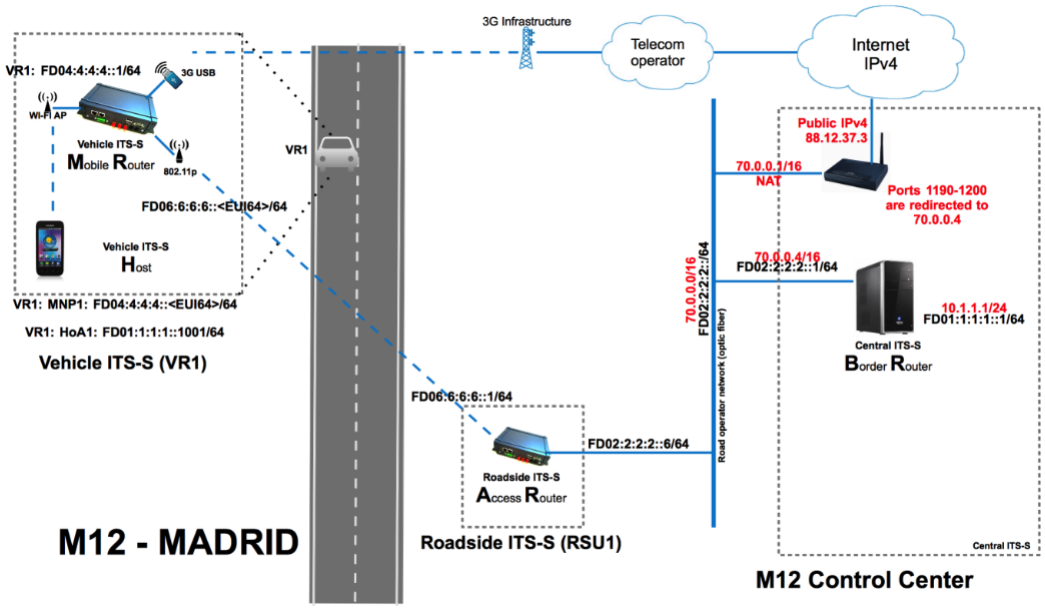

FIGURE 3.7 – Architecture de la communication pour l'interopérabilité des tests

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Des modifications ont été faites sur le système Co-Drive afin de l'adapter à la configuration FOTsis ainsi l'application smartphone utilisée dans Co-Drive a été aussi adaptée pour afficher les alertes provenant du RSU FOTsis.

Description des scénarios.

Les messages CAM et DENM sont supposés être utilisés dans différents cas, à cause de leur nature. Les messages CAM sont distribués via le 802.11p et donnent des informations de présence, de positions aux stations ITS situées à un saut. Les messages DENM sont aussi distribués via 802.11p, et sont utilisés pour alerter les utilisateurs d'événements possibles. Ces messages possèdent la position de l'événement, la zone affectée et la durée de l'événement.

FOTsis a développé deux services utilisant ces messages. Le premier gère les événements de la route en utilisant les messages DENM, il avertit le conducteur sur la météo, les travaux, etc. Le centre de contrôle du trafic possède une base de donnée sur ces événements et les diffuse au véhicule par le moyen du RSU tant que l'événement est d'actualité. Ces messages contiennent la position de l'événement (latitude et longitude), la durée de l'événement, la fréquence de dissémination et la description de l'événement. Le deuxième est un service de suivi du véhicule, utilisant les messages CAM et indiquant au conducteur le moment où il rentre dans une zone géographique particulière (ici un cercle autour de la position du RSU). Le RSU reçoit ces messages CAM du véhicule et les envoie au centre de contrôle du trafic. Nous utilisons ces deux services pour tester l'interopérabilité des projets Co-Drive et FOTsis.

3.1.2.2 Les essais en conditions réelles

Dans les sections suivantes nous présentons les tests. Le RSU et le routeur mobile du véhicule utilisent le canal 180 (5.9GHz). Le routeur du véhicule a été mis à sa puissance d'émission maximale.

Le véhicule effectue le trajet de la figure 3.6 en changeant de voies durant les tests (de la plus proche du RSU, 30 mètres, à la plus éloignées, 100 mètres) et à différentes vitesses : de 70 à 120 km/h. Le routeur mobile dans le véhicule envoie des messages CAM avec une fréquence de 10 messages par seconde. Le routeur mobile envoie également des données telles que : la vitesse du véhicule, son accélération et sa position GPS. Lorsque le véhicule entre dans la zone du RSU, une notification est reçue par le service de suivi du centre de contrôle du trafic, il en est de même lorsque le véhicule en sort. SICE, un partenaire du projet, se charge de transformer les messages sur des événements ponctuels routiers du centre de contrôle du trafic, en messages DENM. Le RSU diffuse ensuite ces messages (broadcast) limité par sa distance de communication. Les événements s'affichent correctement sur le smartphone. Les messages DENM eux sont envoyés à la fréquence d'un message par seconde.

Une grande influence de la position de l'antenne sur le toit a été observée. Lorsque cette dernière est située entre le pare-brise avant et le toit panoramique, plus de messages de la part

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

du RSU sont reçus. Lorsqu'elle se trouve derrière ce toit, les messages sont reçus lorsque l'on est proche du RSU. Avec la meilleure position de l'antenne, la zone de couverture est de 500 mètres autour du RSU.

Nous avons testé deux boîtiers différents pour le routeur mobile 802.11p : Mimokit (Co-Drive) et Laguna (FOTsis). La réception très omnidirectionnel de l'équipement FOTsis a permis d'avoir une gamme plus large que le routeur mobile de Co-Drive, environ 1 km autour du RSU. Cependant la diversité de l'équipement ne remet pas en cause le potentiel du système et des perspectives de service.

FIGURE 3.8 – Application Co-Drive qui affiche les messages d'alertes DENM

3.1.2.3 Conclusion

Ces tests ont servi à montrer la compatibilité des architectures des projets Co-Drive et FOTsis, dans le sens où ils ont été capable d'échanger avec leur propre matériel. Le format des messages selon le standard ETSI : CAM et DENM v1 ASN.1 a permis des tests de service ITS avec succès. Ainsi l'architecture des services de suivi du véhicule et d'alerte d'événement routier proposés par le projet FOTsis ont très bien fonctionné avec un véhicule Co-Drive et une borne FOTsis. Nous pouvons affirmer que le test d'interopérabilité effectué a montré la correspondance des différentes couches de communication au niveau applicatif.

Après validation de la communication et de l'interopérabilité du système nous effectuons un test réel avec ce dernier sur une application ITS dans la section suivante.

3.1.3 Un véhicule et un feu de circulation

3.1.3.1 Contexte

Le domaine des ITS a mené les constructeurs et équipementiers automobiles ainsi que les instituts de recherche à déployer des applications et des services pour améliorer l'efficacité du trafic, la sécurité routière et réduire les rejets en CO2. La communication V2X devient alors un centre d'intérêt pour tous les ADAS : "Systèmes Avancés d'Aide à la Conduite". Elle permet d'augmenter le champ de vision du véhicule (plus d'angle mort), d'anticiper des situations (arrêt d'urgence), de coopérer avec les autres véhicules et d'échanger des données avec l'infrastructure

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

(feux vert pour les véhicules d'urgence). Les ITS liés aux ADAS pour contrôler le trafic et réduire les émissions de CO2 sont actuellement en pleine expansion, dans ce contexte les feux de circulation communicants sont largement étudiés. Un état de l'art sur les différents contrôles des intersections est présenté dans la section 4.1.

Dans cette section, nous nous concentrerons sur un service particulier développé dans Co-Drive, à savoir un service permettant un échange entre le véhicule et le feu de circulation afin de sécuriser les intersections et faciliter leurs conditions de trafic.

Ce service s'appelle GLOSA : *Green Light Optimal Speed Advisory system*. GLOSA informe le conducteur de la vitesse à maintenir pour passer le prochain feu de circulation au vert. Techniquement le feu coopératif envoie l'information nécessaire au véhicule grâce à la communication V2I, et ce dernier est capable de calculer la vitesse optimale et en informer le conducteur via un ADAS. GLOSA est inclus dans la liste des applications de base de l'ETSI TC ITS, l'institut liste les services utilisant la technologie V2X qui pourront être déployés une fois la standardisation achevée. GLOSA permet d'améliorer la fluidité du trafic en limitant les temps d'arrêt, il permet aussi d'améliorer la sécurité des usagers, de réduire la consommation en carburant, les émissions de CO2, le temps d'attente et le temps de voyage.

Nous allons tester GLOSA, tout d'abord sur un test réel puis ensuite sur un test simulé équivalent afin de comparer les résultats théoriques et pratiques et ainsi montrer la fiabilité du modèle de simulation.

3.1.3.2 Expérimentation réelle

Nous présentons ici un test réel de l'application GLOSA réalisé par Valeo dans le cadre du projet Co-Drive avec un véhicule, un feu de circulation sur le circuit du CERAM (Centre d'essais ouvert aux constructeurs automobiles) à Mortefontaine (60) d'une longueur de 3000 mètres.

L'expérimentation s'est donc déroulée sur le circuit avec deux feux de circulation dont la position est montrée dans la figure 3.9. Les feux ne sont pas synchronisés et fonctionnent donc de manière indépendante à une distance de 1500 mètres l'un de l'autre.

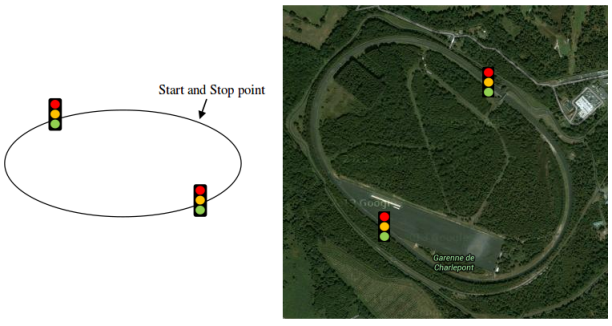

FIGURE 3.9 – Circuit du CERAM avec emplacement des feux de circulation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Les feux de circulation possèdent une antenne et un Raspberry Pi embarqué connecté en Ethernet à un boîtier capable d'envoyer les données en wifi (routeur 802.11p, voir la figure 3.10). Le feu de circulation est alors capable via cette communication V2X d'envoyer les informations suivantes aux véhicules approchants : identité, unité de temps, latitude, longitude, phase du feu actuel, temps avant le changement de phase, durée totale d'un cycle : vert/jaune/rouge. Les durées des phases du feu sont fixes et sont les suivantes :

- Rouge : 30 secondes
- Jaune : 2 secondes
- Vert : 25 secondes

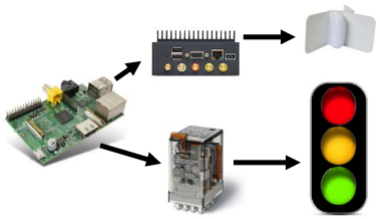

FIGURE 3.10 – Équipement du feu de circulation

Un seul véhicule est utilisé, une Peugeot 207 [49], équipée d'un boîtier de communication wifi (802.11p) pour recevoir les données envoyées par le feu. Un smartphone est aussi embarqué, il reçoit les informations envoyées par le feu de circulation au véhicule grâce à l'équipement V2X embarqué dans le véhicule. Il peut également stocker les informations de localisation et de vitesse grâce au GPS embarqué dans le véhicule. Ensuite une interface spécifique à GLOSA permet de diffuser l'information calculée à partir des informations reçues (HMI-Human Machine Interface). L'implémentation de l'algorithme GLOSA utilisé au sein du véhicule a été faite sur la base de l'article de Katsaros et al [69].

Des tests préliminaires de simulations de GLOSA ont montré la bonne acceptation du système de recommandation par l'usager, cependant il a été remarqué qu'une indication textuelle de l'information n'est pas intuitive pour le conducteur. Par conséquent, une meilleure implémentation de la partie HMI a été effectuée avec une lecture plus rapide et intuitive pour le conducteur de la vitesse à adopter, la figure 3.11 montre cet affichage intuitif de la vitesse recommandée. Il donne les rangs de vitesse correspondant aux différentes phases du feu de circulation.

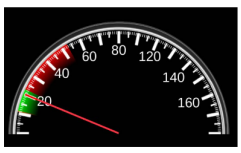

FIGURE 3.11 – "Human Machine Interface"

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

3.1.3.3 Environnement de la simulation correspondante

Le simulateur utilisé est SUMO (Simulation of Urban MObility) version 0.22 [10]. C'est un logiciel "open source" permettant une simulation continue du trafic routier. L'interface du contrôle du trafic TraCI (Traffic Control Interface) disponible dans SUMO [122] permet de contrôler en temps réel de manière individuelle chaque véhicule ou chaque infrastructure impliqué dans la simulation. Il permet également d'obtenir n'importe quelle information trafic en temps réel de la simulation. Ce dernier nous permet donc d'implémenter GLOSA dans notre simulation. Les paramètres physiques (circuit, implantation des feux, caractéristique physique de la voiture Peugeot 207) sont ajustés dans SUMO pour correspondre à la réalité décrite dans la section 3.1.3.2. La figure 3.12 représente le circuit simulé dans SUMO (nous verrons plus de détails du simulateur dans la section suivante 3.2).

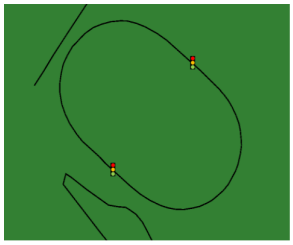

FIGURE 3.12 – Carte du circuit du CERAM avec emplacement des feux de circulation dans SUMO

3.1.3.4 Résultats : corrélation entre le réel et la simulation

Les mesures présentées montrent l'effet du système GLOSA en termes de vitesse et d'émissions de CO2. Les figures 3.13 montrent le profil de la vitesse avec le système GLOSA et sans le système durant les tests réels (a) et durant les tests simulés (b). La consommation en CO2 est mesurée dans SUMO grâce au modèle HBEFA (The Handbook Emission Factors for Road Transport) qui fournit des facteurs d'émission pour toutes les catégories de véhicules actuels, chacun divisé en différentes catégories, pour une grande variété de situations de trafic. Les deux figures montrent que le véhicule ne s'arrête pas avec le système GLOSA. Le profile de la vitesse dans le cas réel est plus lisse que dans les cas simulé. En effet le véhicule se met directement à la vitesse recommandée par le système dans le cas simulé, alors que dans la réalité le conducteur va diminuer progressivement sa vitesse pour atteindre celle optimale préconisée par GLOSA. Cependant le scénario réel et le scénario simulé possèdent les mêmes résultats en terme de vitesse.

Les figures 3.13 montrent également les rejets en CO2 dans les deux scénarios : réel (c) et simulé (d). La réduction d'émission de rejet en CO2 avec le système GLOSA est dû au fait de l'évitement d'une accélération du véhicule après un arrêt total, ce qui est fortement consommateur d'énergie. Une réduction de 11% est observée dans le scénario simulé et de 13% dans le scénario réel. Cette légère différence est peut-être due aux profils des accélérations/décélérations différents entre les deux scénarios (abrupte dans le cas simulé). De

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

plus, la simulation ne peut prendre en compte tous les paramètres du moteur du véhicule mis en jeux dans la réalité. Toutefois cette différence apparaît mineure dans les résultats globaux.

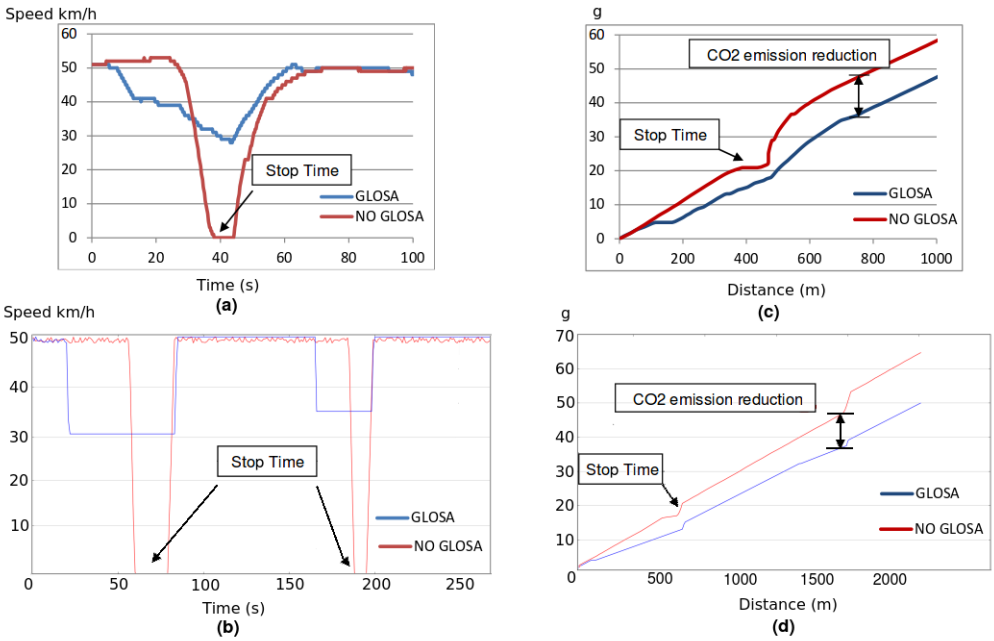

FIGURE 3.13 – Vitesse (km/h) en fonction du temps (s) : test réel (a) test simulé (b) // Emissions de CO2 cumulées (g) en fonction de la distance parcourue (m) : test réel (c) test simulé (d)

3.1.3.5 Conclusion

Cette comparaison entre un test en condition réelle et une simulation représentant les mêmes conditions confirme que les simulations mises en oeuvre dans SUMO avec les paramètres par défaut sont fiables sur ce genre d'application ITS à petite échelle. Ceci nous permettra d'approfondir les résultats et les tests de simulation de l'application GLOSA, d'effectuer une mise à l'échelle et une extrapolation des résultats dans le chapitre 4.

3.2 Moyenne échelle

3.2.1 Le rond point d'Europarc à Créteil

Nous avons vu que sur une petite échelle la reproduction de la réalité à travers la simulation est possible, rapide et fiable du fait du peu de nombre de paramètres mis en jeux. Cependant lorsque l'échelle devient plus grande la simulation devient nécessaire et il est important qu'elle reproduise la réalité afin d'obtenir des études fiables. Actuellement la mobilité microscopique est souvent simplifiée dans les systèmes macroscopiques. Dans cette section nous mettons en avant l'importance de la description et de la compréhension de la mobilité sur une carte locale à savoir

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

une intersection, plus particulièrement un rond point. Nous allons montrer que la plupart des modèles disponibles dans la littérature ou les simulateurs ne sont pas valables pour reproduire de manière fiable la réalité de la mobilité véhiculaire à échelle microscopique. Nous validerons en revanche un modèle concernant l'arrivée successive des véhicules sur la carte.

3.2.1.1 Contexte

Les applications dans le contexte des ITS énoncés dans la section 2.1.3.1 à travers différents projets ont besoin d'expérimentation dans un contexte réel du type décrite dans la section précédente relatif à l'application GLOSA. Cependant ce genre d'expérimentation devient très coûteuse en équipement et en organisation lorsque l'on souhaite tester des applications de coopération nécessitant une plus grande échelle. De plus, les conditions réelles de circulation sont difficiles à reproduire dans le cadre de test dans un environnement contrôlé sur le terrain. Il est alors nécessaire d'utiliser la simulation pour obtenir de premières conclusions sur les systèmes de transport intelligent à déployer dans le futur. Lorsque l'échelle est petite comme dans le cas précédent avec une seul véhicule en jeu, la simulation est en mesure de reproduire de manière fiable la réalité. Mais lorsque l'échelle s'agrandit, du trafic véhiculaire, des topologies routières différentes, des règles de circulation, des voyages plus longs avec un facteur humain non négligeable apparaissent, rendant la simulation complexe à mettre en place. Or les échelles qu'elles soient macroscopiques ou microscopiques exigent une grande fiabilité afin d'obtenir des résultats crédibles. D'où l'importance d'avoir des traces réelles actuellement difficiles à obtenir (coût, confidentialité).

Etat de l'art.

Cette difficulté d'accès à des traces réelles, a entraîné l'utilisation de modèles simplifiés du trafic véhiculaire pour contourner le problème [91]. Cependant l'intérêt grandissant pour les VANETs, entraîne des études sur l'élaboration de modèles plus complexes et de plus grande qualité permettant de reproduire les mouvements des véhicules avec davantage de précision. Certaines approches basent leur modèles directement à partir de traces réelles [90], d'autres essayent de reproduire des flux de trafic [78]. Un des défis des études sur les VANETs est d'identifier les comportements des flux routiers dans la réalité afin de générer des modèles du trafic ainsi que des traces fidèles à la réalité [57] afin de pouvoir interpréter correctement les études portant sur ces données.

Peu de traces à large échelle sur la mobilité macroscopique sont actuellement disponibles et publiques [61], quant aux traces microscopiques elles sont très difficiles à trouver et les données disponibles se concentrent d'avantage sur les modèles microscopiques de mobilité véhiculaire que du trafic en lui même avec différentes directions (données NGSIM sur 500 mètres d'autoroute). Cependant analyser des traces sur le trafic microscopique peut aider à expliquer des phénomènes locaux (contrôle des feux de circulation, embouteillages locaux). Elles peuvent être aussi utilisées pour améliorer la fluidité du trafic localement pouvant avoir un impact global sur le réseau véhiculaire [76].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Carte du rond point.

La trace de trafic véhiculaire que nous allons présenter dans cette section porte sur le rond point d'Europarc à Créteil en France. Situé en face du bâtiment de Valeo, toutes les informations visuelles (infrastructure) de ce rond-point furent faciles à obtenir. La carte de ce rond-point est obtenue via la base de données OpenStreetMap [1]. OSM est un projet collaboratif visant à créer un carte du monde libre et modifiable par tous les utilisateurs. La carte inclut les routes, les voies ferrées, les bâtiments, les points d'intérêts, les parkings, les parcs, les centres commerciaux, les zones de loisirs, etc. Les informations des routes OSM sont validées et générées par des traces GPS des contributeurs du site. OSM est communément considéré comme un site de données routières de haute qualité accessible au public. Nous exportons donc une carte de 1.1 km^2 du rond point sous le format xml sur ce site. Ensuite nous utilisons JOSM [1], Java OpenStreetMap Editor, pour corriger les données recueillies sur le site OSM afin de les rendre compatibles avec la réalité. En effet comme OSM est un site dépendant des contributeurs, le rond-point de Créteil manquait d'information sur sa description réelle (voir la section 3.2.1.2).

Mobilité des véhicules.

Nous utilisons SUMO version 0.22 pour modéliser le trafic véhiculaire, et le comportement des conducteurs. SUMO est capable d'importer une carte du site OSM via le format xml en reproduisant de manière fidèle les routes, les feux de circulation, les panneaux de circulation, les nombres de voies, etc. Le modèle microscopique implémenté dans SUMO pour le mouvement des véhicules est celui de Krauss : "loi de poursuite des véhicules" [74]. Dans ce modèle SUMO permet de changer la distance de sécurité minimale entre les voitures, leur accélération, leur décélération ainsi que l'imperfection du conducteur dans sa conduite (erratique ou déterministe). Le modèle du changement de voie utilisé est celui de Krajzewicz [73], il permet la régulation et la distribution du trafic dans le cas de plusieurs voies, il inclut également les décisions de dépassement en cas de plusieurs voies de même sens. Ces modèles ont été largement validés par la communauté de recherche sur le transport. La grande flexibilité de SUMO fait de ce simulateur le plus complet et le plus fiable des générateurs de micro-mobilité en open source actuellement.

Données du trafic.

Les informations trafic du rond point d'Europarc ont été obtenues à partir d'observations réelles du flux des véhicules effectuées sur deux périodes horaires de la journée d'un Mardi en septembre (période de travail en France). Des cameras placées sur le site ont permis d'observer en détails le trafic. Un comptage manuel a été effectué afin de créer une matrice O/D (Origine/Destination) toutes les 900 secondes. La matrice représente les mouvements des véhicules sur deux périodes considérées comme étant des heures de pic : de 7 heures 15 à 9 heures 15 du matin puis, de 17 heures à 19 heures le soir. Le comptage a été effectué en distinguant les différents types de véhicules : camions, voitures, deux roues et bus. Comme les deux roues ne représentent que 5% du trafic le matin et 3.6% du trafic le soir, nous ne les considérons pas dans

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

la simulation ; nous faisons de même pour les camions (dont nous n'avons pas d'information sur le type : lourd ou léger) qui ne représentent que 4.5% du trafic le matin et 1.5% le soir.

Caractéristique du rond point.

Le rond point est composé de 6 entrées et 6 sorties, 2 entrées et 2 sorties sont exclusivement réservés aux bus. La voie des bus est visible sur la figure 3.14 par des boucles à induction détectant leur présence (de couleur jaune). D'autres boucles à induction -non indiquées- sont placées sur les voies de sorties du rond point afin de mesurer le taux d'occupation. 15 feux de circulation sont présents dont 12 sont situés à l'intérieur du rond point afin d'y réguler le trafic ; 3 sont pour les piétons et fonctionnent même s'il n'y a pas de piéton et enfin 4 parmi les 12 sont réservés aux bus. Les 4 lignes blanches visibles aux intersections sur la figure 3.14 représentent des intersections sans feux et indiquent les sorties du rond point.

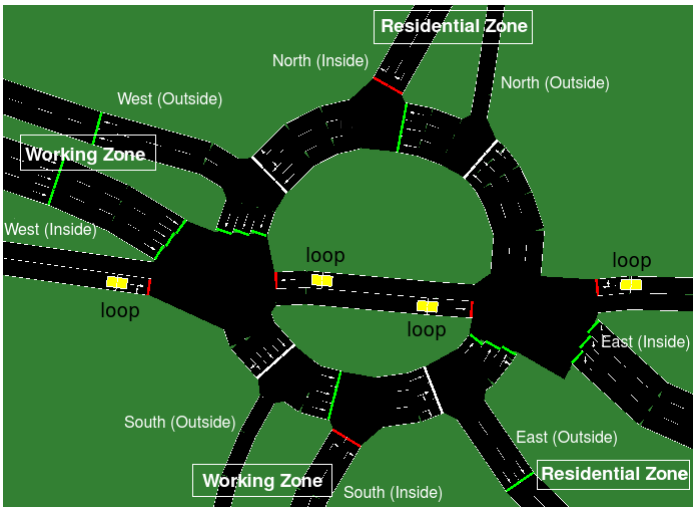

FIGURE 3.14 – Le rond point d'Europarc Créteil dans SUMO

Simulation.

La carte OSM du rond point d'Europarc de Créteil, est donc convertie en format lisible par SUMO. Les données du trafic mesurées par les caméras sont introduites dans SUMO sous forme de flux de véhicule dans un fichier xml. Ce fichier permet d'introduire "x" véhicules à partir d'une voie précise et à destination d'une autre voie toutes les "y" secondes, tout en spécifiant le type de véhicule. Cette description du flux de véhicule est la méthode la plus fiable pour introduire la matrice O/D toutes les 900 secondes, car elle permet un taux d'erreur faible entre les flux de données réels et simulés, comme l'indique le tableau 3.4. En effet il est négligeable avec un flux simulé similaire à 94.4% au flux réel.

3.2.1.2 Réparation des données

Les résultats obtenus en utilisant la mobilité véhiculaire décrite dans la section précédente sur la carte extraite du site OSM sont inutilisables (la figure 3.14 représente le rond-point après

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

la réparation des données). En effet, la figure 3.15 montre l'évolution du nombre de véhicule traversant le rond point sur une durée de 2700 secondes soit 45 minutes, et le nombre de véhicules présent sur la carte croît rapidement jusqu'à dépasser la capacité du rond point et montre une configuration irréaliste. Le nombre de véhicule finissant leur voyage augmente lentement dans le temps alors que ceux voyageant augmentent rapidement montrant qu'une congestion est apparue et seule une petite fraction de véhicule est capable de finir leur trajet. La topologie de la carte ne peut donc encaisser le nombre de véhicule injecté et répondre à la demande en temps voulu. Les figures 3.16 confirment ce profile irréaliste, avec une vitesse décroissant rapidement due à la formation d'une congestion, et un temps de parcours continuellement croissant, signifiant que les véhicules restent bloqués. Dans les sections suivantes nous discutons des raisons et des solutions à apporter pour obtenir une simulation viable et fidèle à la réalité.

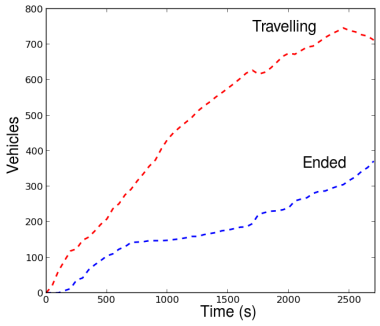

FIGURE 3.15 – Statuts des véhicules durant 45 minutes

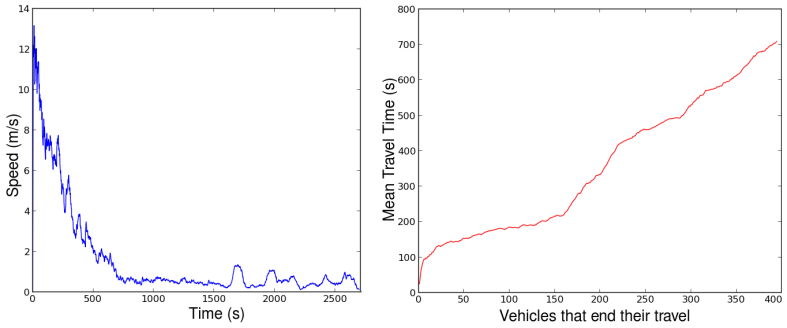

FIGURE 3.16 – Vitesse moyenne et temps de parcours moyen des véhicules durant 45 minutes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Mauvaises données cartographiques.

La première source d'erreurs se trouve dans la topologie des routes issues d'OpenStreetMap. Les informations du site sont parfois inconsistantes avec la réalité (comme le rond point est une carte locale, peu de contributeurs d'OSM ont travaillé dessus). Considérons la figure 3.17 (a) représentant une photographie réelle du rond point à gauche et la carte OSM correspondante zoomée sur une intersection du rond point à droite, sur cette dernière, nous pouvons observer que la voie à l'Est contient 4 voies de circulation, alors que dans la réalité il n'y en a que 3. Ensuite comme beaucoup de véhicules possèdent la même trajectoire, certaines voies ne sont pas utilisées, comme nous pouvons le voir dans les cercles blancs sur la figure 3.17 (b), ce qui entraîne un stockage de véhicules attendant indéfiniment leur tour. D'autres problèmes proviennent de certaines directions qui se trouvent fausses sur certaines voies. Un exemple est montré sur la figure 3.17 (a), les véhicules venant du Sud et de l'Est ont le droit d'emprunter les voies réservées aux bus. Nous résolvons ces problèmes grâce à JOSM. Ensuite en observant le trafic, des mauvaises ou de fausses connections entre les voies sont détectables. Il faut alors les rectifier directement dans le fichier xml de la carte. Par exemple dans la figure 3.17 (b), la voie 3 n'est pas connectée aux voies 1 et 2, par conséquent les véhicules voulant utiliser la voie 1 ou la 2 ne peuvent pas provenir de la voie 3, ce qui entraîne des congestions non réalistes. Beaucoup de connections absentes ou fausses ont été identifiées, empêchant l'utilisation de toute la capacité du rond point par les véhicules.

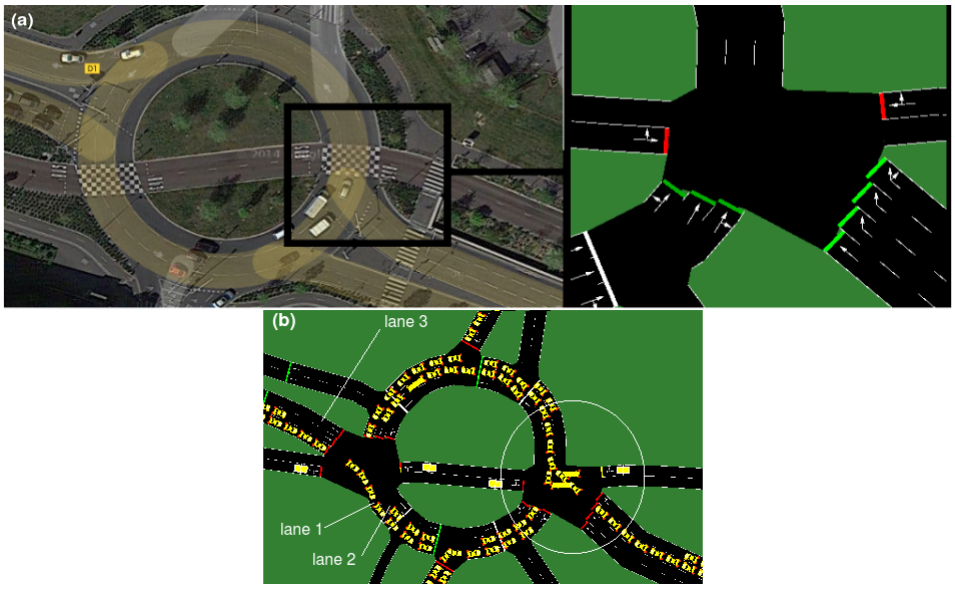

FIGURE 3.17 – (a) Exemple d'erreurs de topologie, (b) exemple d'erreurs de trafic véhiculaire

Programmes des feux de circulation.

L'importation entre OSM et SUMO se fait automatiquement, ce qui entraîne des erreurs topologiques. Celles-ci étant résolues, la simulation ne reflète toujours pas la réalité, des congestions irréalistes persistent. Nous nous concentrons donc sur les feux de circulation qui jouent

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

un rôle majeur sur le trafic. OSM inclut la présence des feux de circulation aux intersections et SUMO inclut de manière automatique une programmation fixe de ces feux lors de l'importation en fonction de la priorité des routes (routes résidentielles ou artères urbaines). Tout d'abord la position des feux est approximative dans OSM, nous devons donc les placer correctement, en rajouter certains et en enlever d'autres. Enfin la programmation des feux n'est pas fixe, elle est même très complexe. Ainsi des boucles à induction doivent être placées sur les voies des bus afin que les feux passent au vert lorsque les bus approchent du rond point afin de leur donner la priorité. Ensuite d'autres boucles doivent être placées sur les routes entrantes dans le rond point afin de détecter le taux d'occupation et de changer la programmation des feux en fonction de ce dernier. Par exemple, si le taux d'occupation dépasse x% la phase verte du feu est prolongée. Cette dynamique a été fournie par le Conseil Général du Val de Marne, tous les détails sur les programmes des feux ont pu ainsi être implémentés dans SUMO.

Départs et arrivées des véhicules.

Nous avons accès aux flux réels des véhicules dans toutes les directions : Sud-Sud/Nord/Est/Ouest ; Nord-Sud/Nord/Est/Ouest ; Est-Sud/Nord/Est/Ouest et Ouest-Sud/Nord/Est/Ouest toutes les 900 secondes. En utilisant SUMO, nous entrons ces données de flux dans un fichier xml. Cependant malgré la facilité d'introduire ces flux, nous devons modifier le départ et l'arrivée des véhicules afin de simuler une vraie circulation au niveau du rond point. En effet nous ne savons pas à quel endroit exactement les véhicules ont été comptés, pour éviter des embouteillages aux entrées dus à une introduction trop importante de véhicules, nous avons décidé de les introduire à l'extérieur du rond point. Malgré cette correction, la similitude entre les flux réels et les flux simulés reste forte avec une ressemblance de 95.5% environ toutes les 15 minutes pour les flux du soir, comme le montre le tableau 3.4.

Heures	Données Réelles Nombre de véhicule	Données Simulées Nombre de véhicule	Similarité
5.00-5.15	658	526	80%
5.15-5.30	643	657	97%
5.30-5.45	660	670	98%
5.45-6.00	636	607	95%
6.00-6.15	670	649	97%
6.15-6.30	636	633	99%
6.30-6.45	661	657	99%
6.45-7.00	541	600	90%

TABLE 3.4 – Similarité entre les données réelles et les données synthétiques

3.2.1.3 Trafic urbain locale

La totalité des voyages représentent 10 000 trajets sur une période de 4 heures (2 heures le matin et 2 heures le soir). Après les corrections de la carte, la programmation réelle des feux, ainsi que l'introduction de ces flux, la simulation imite avec fidélité l'activité quotidienne réelle du trafic sur le rond point. Nous pouvons donc étudier cette simulation et montrer sa fiabilité à travers l'étude d'éléments sur les comportements véhiculaires locaux. Nous montrerons ensuite

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

l'importance d'avoir des données réelles pour étudier ces comportements.

La preuve d'un comportement cohérent du trafic simulé avec la réalité est montrée dans les figure 3.18 et 3.19. Ces graphes peuvent être comparés à la figure 3.15 qui montrait le trafic sans aucune modification ou correction. Nous collons maintenant avec un comportement cohérent, avec un nombre de véhicules voyageant stable au cours du temps et une augmentation linéaire du nombre de véhicules arrivant à destination en fonction du temps. Ensuite la moyenne du temps de parcours est stable au cours du temps avec un pic correspondant à celui du matin. Enfin, la vitesse moyenne est stable et confirme les résultats énoncés ci-dessus à savoir un comportement stable et réaliste au cours du temps.

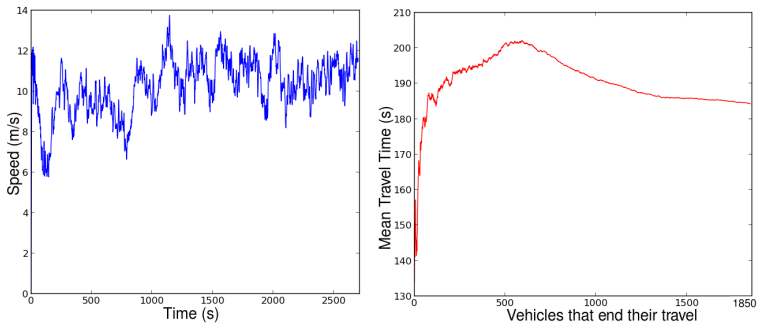

FIGURE 3.18 – Vitesse moyenne et temps de parcours moyen des véhicules

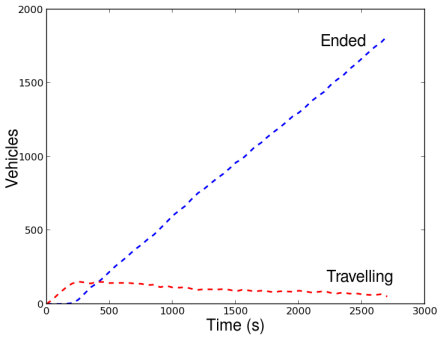

FIGURE 3.19 – Statuts des véhicules durant 45 minutes

Nous nous concentrons maintenant sur les éventuelles correspondances avec la réalité en terme de trafic microscopique. Ces données sur les flux de véhicules du matin et du soir sur ce rond point sont intéressantes car elles représentent un lieu d'échange entre les zones résidentielles et les zones de travail (voir la figure 3.14). Les figures 3.20 et 3.21 représentent la moyenne du taux d'occupation sur chaque route du rond point durant les 2 heures du matin et les 2 heures du soir. Pour chaque direction, Nord, Sud, Est et Ouest, il y a un flux de véhicule important dans une direction le matin et dans la direction opposée le soir. En fait, les conducteurs quittent les zones résidentielles le matin pour aller au travail et le soir ils font le chemin inverse en rentrant chez eux. Ces observations montrent le réalisme des données et de leur implémentation. Les propriétés clés (taux d'occupation, temps de trajet) des schémas de trafic de la réalité sont

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

reproduites dans la simulation.

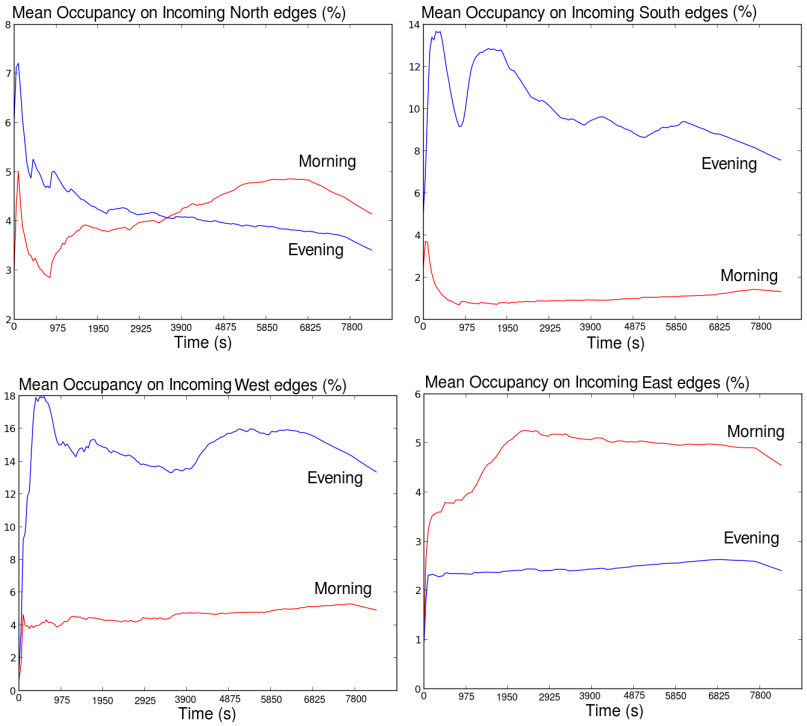

FIGURE 3.20 – Taux d'occupation le matin et le soir sur les liens entrants

3.2.1.4 Résultats : importance des données réelles pour la simulation

Sur le flux des véhicules.

Nous comparons deux modèles de trafic communément utilisés afin de montrer l'importance d'avoir une connaissance des données réelles d'une carte locale. Nous comparons les taux d'occupation des liens entrants et des liens sortants du rond point avec les deux modèles.
Pour simuler ces différents flux de véhicules nous émettons l'hypothèse que nous connaissons seulement le nombre de véhicules entre 7.15 et 9.15 du matin (5000 voyages) et nous gardons les flux réels des bus, en effet il est facile de retrouver leurs heures de passage au niveau du rond point sur le site des transports publics de la ville de Paris. Le premier modèle est représenté par une loi de Poisson, très utilisée pour simuler la loi d'arrivée des véhicules [85]. Nous considérons également que la topologie de la carte nous aide à déterminer de manière approximative la capacité des flux, donc nous introduisons plus de véhicules sur les voies entrantes à l'Est et à l'Ouest car elles sont plus importantes que les voies du Sud ou du Nord (3 voies contre 2). Le deuxième modèle appelé "turn probability" permet d'estimer la probabilité de sortir du rond point ou d'y rester. Ce modèle est souvent utilisé sur la grille de Manhattan [100] aux niveau des intersections. Le véhicule a donc 30% de chance de sortir à chaque intersection. Les figures 3.22 et 3.23 montrent les taux d'occupation de chaque lien en fonction du modèle des flux de véhicules utilisé. Le modèle avec la loi de Poisson a un taux régulier sur les liens sortants et il est proche de la réalité sur les liens entrants plus étroits (Sud et Nord). Cependant une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

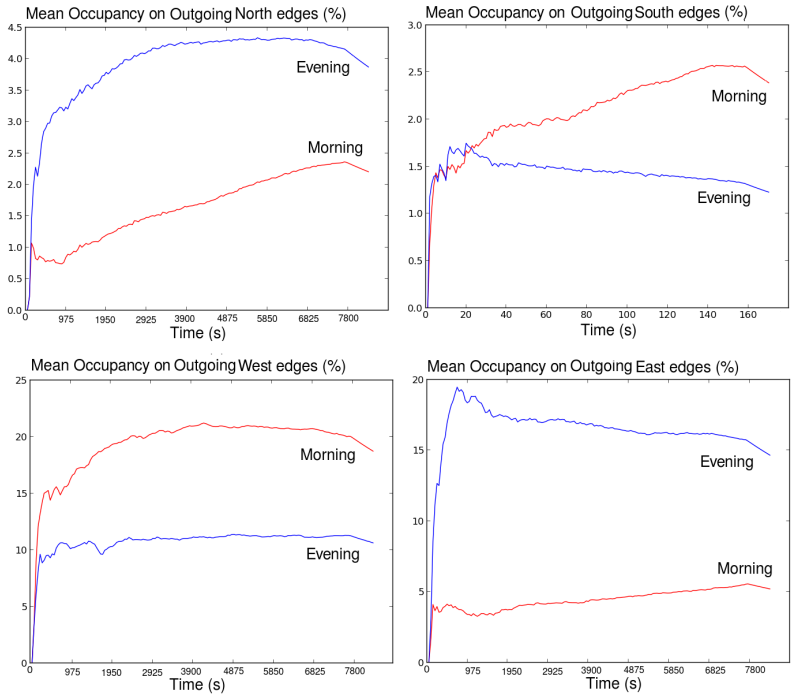

FIGURE 3.21 – Taux d'occupation le matin et le soir sur les liens sortants

congestion est observée sur les liens entrants à l'Est qui montre que nous avons introduit trop de véhicules sur cette route. Notre approximation du flux à l'aide de la largeur des voies et l'utilisation de la loi d'arrivée de Poisson donne des résultats proches de la réalité sur les liens de petites capacité (Nord et Sud) mais pas sur les liens de grande capacité (Est et Ouest).

Le modèle avec les probabilités de tourner "turn probability", est proche de la réalité seulement sur le lien sortant à l'Ouest. La probabilité de tourner sur une route, dans la réalité, n'est pas déterministe, ce qui peut expliquer les résultats irréalistes pour les liens entrants au Nord et les liens entrants et sortants au Sud. Cependant les résultats sont proches de la réalité sur les liens entrants à l'Est et les liens sortants à l'Ouest. Enfin la figure 3.24, montre la moyenne en temps de parcours et en temps d'attente avec les différents modèles. Les résultats avec la loi de Poisson peuvent être réalistes en terme de flux d'après nos résultats dans un premier temps mais montre une congestion dans un second temps. Nous pouvons observer que le flux augmentent à la manière de la loi de Poisson et que le modèle probabiliste créé une congestion due à la mauvaise connaissance des flux véhiculaires. Nos résultats sont suffisants pour invalider la proposition communément utilisée sur le fait que les arrivées des véhicules suivent une loi de Poisson.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

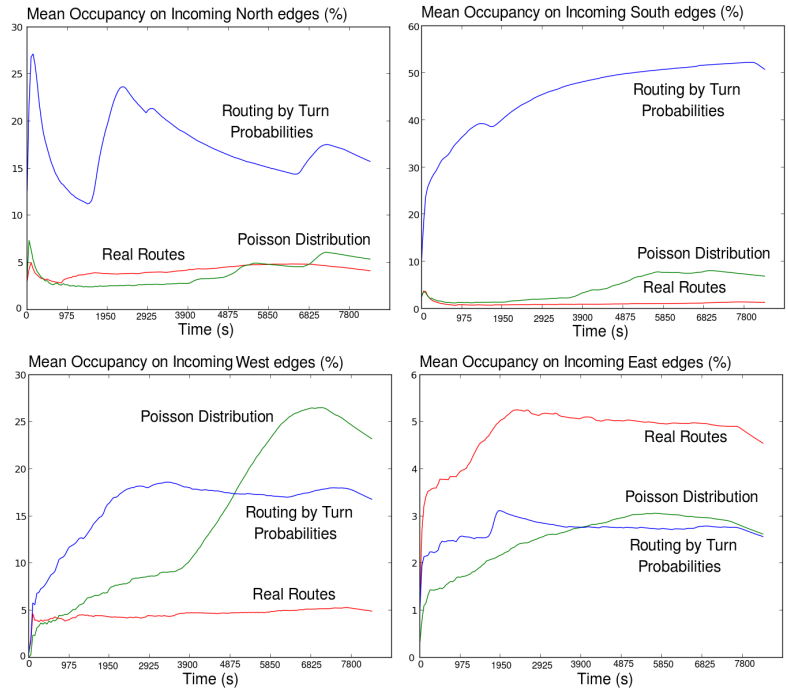

FIGURE 3.22 – Taux d'occupation sur les liens entrants avec des flux de trafic différents

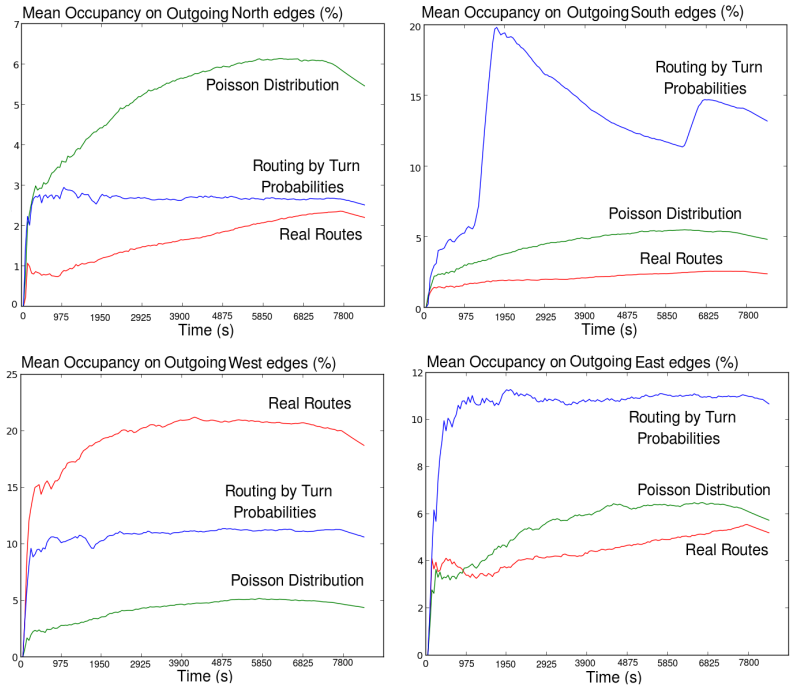

FIGURE 3.23 – Taux d'occupation sur les liens sortants avec des flux de trafic différents

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

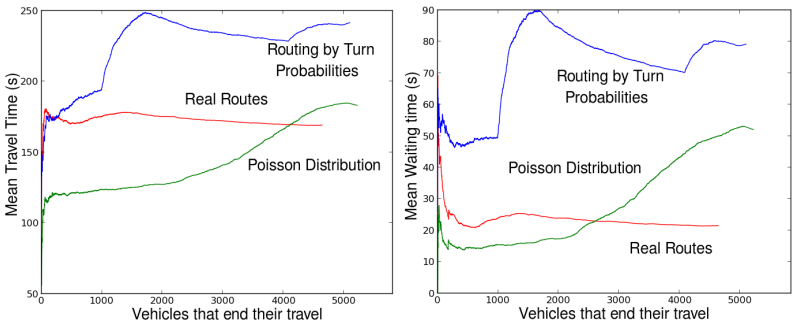

FIGURE 3.24 – Temps de parcours et temps d'attente moyens avec des flux de trafic différents

Pour compléter notre étude nous portons notre intérêt sur une étude [114] qui affirme l'hypothèse que les intervalles d'arrivées entre les véhicules suivent le modèle hybride Weibull-Pareto [68]. Cette hypothèse n'a pas été confirmée par des données réelles jusqu'à présent. La figure 3.25, représente la fonction complémentaire de distribution cumulative (CCDF : Complementary Cumulative Distribution Function) des intervalles d'arrivées des véhicules sur le rond point, elle nous permet de conclure que les intervalles d'arrivées des véhicules dans le scénario considéré suit le modèle hybride Weibull Pareto. Tous les véhicules entrent 10 secondes ou moins après leurs prédécesseurs et ce temps est de 3 secondes pour 50% des véhicules.

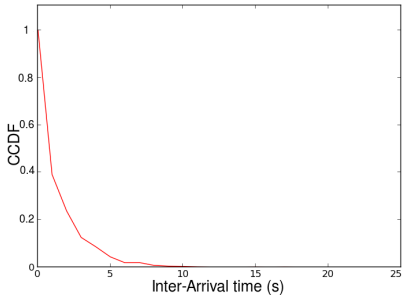

FIGURE 3.25 – Distribution des intervalles d'arrivées des véhicules

Sur les feux de circulation.

Enfin nous montrons dans cette section l'importance de connaître les programmes des feux de circulation. Nous considérons les vrais programmes fournis par le Conseil Général du Val de Marne qui sont optimisés en s'adaptant selon le taux d'occupation détecté sur les voies contrôlées par les feux de circulation. De plus des boucles à induction détectent les bus afin que les feux passent au vert, leur donnant ainsi la priorité sur leurs voies de circulation réservée. Nous comparons ces programmes optimisés avec des programmes fixes importés par défaut dans OSM et des programmes adaptatifs disponibles dans SUMO où les phases peuvent se prolonger en fonction des intervalles de temps mesurés entre les véhicules approchant les feux. La figure 3.26 montre clairement que les programmes fixes amènent de la congestion, en revanche les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

programmes adaptatifs de SUMO sont proches de la réalité mais ne sont pas stables. De plus, cette augmentation linéaire observée du temps de parcours et du temps d'attente pourraient mener à une atteinte de la capacité maximale du rond point. Ces résultats montrent l'impact et l'importance du modèle des feux de circulation qui doivent répondre à la réalité de la topologie du terrain et qui ne sont donc pas standards.

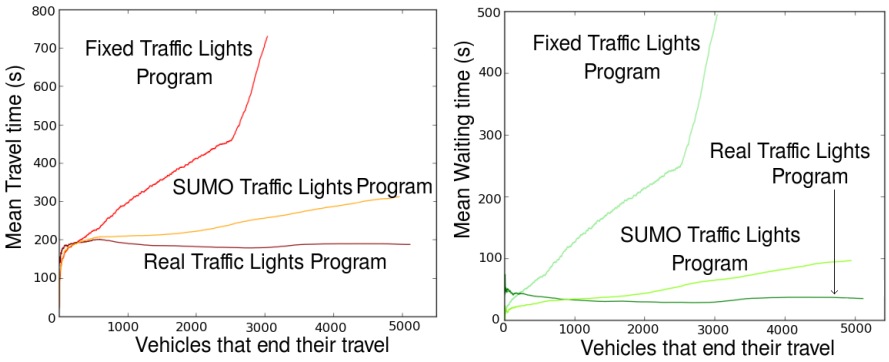

FIGURE 3.26 – Temps de parcours et temps d'attente moyens avec des programmes différents de feux de circulation

3.2.1.5 Conclusion

La simulation du rond point d'Europarc à Créteil en utilisant les données réelles collectées montre que des flux véhiculaires, des topologies du terrain et des coordinations des feux de circulation faux ou artificiels peuvent amener des trafics véhiculaires complètement différents et donc avec des propriétés très variées. En particulier des tests sur les traces de mobilité basées sur des modèles communs apparaissent loin des flux véhiculaires réels et échouent dans la représentation des flux quotidiens des véhicules. Cependant nous devons clarifier le point suivant : certains modèles, même si ils ne sont pas réalistes, peuvent néanmoins pointer des caractéristiques précises dans des contextes très précis et dépendent fortement du but recherché par l'investigateur. Nous avons également montré que le modèle hybride Weibull-Pareto correspond bien aux intervalles réels d'arrivées des véhicules collectés. La trace du rond point générée est disponible sur un site web [1]. Nous tenons à remercier le Conseil Général du Val de Marne (94) pour leur aide précieuse, spécialement Matthieu Perigaud, responsable des études de trafic qui nous a fourni toutes les données afin de réaliser cette étude.

3.3 Large échelle

La simulation est donc un outil de choix pour l'évaluation des applications des systèmes ITS à grande échelle, notamment pour étudier l'impact et les performances de service nécessitant une coopération entre les entités. Nous avons vu la complexité de la simulation microscopique, il en est de même pour la simulation macroscopique. Aujourd'hui, le défi réside dans la génération

1. http ://vehicular-mobility-trace.github.io/

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

de trace suffisamment grande pour anticiper des tests réels grandeur nature dans des régions urbaines étendues (à savoir des villes avec leurs alentours). Ces traces doivent être réalistes et reproduire fidèlement les flux de transport.

3.3.1 Trace de la ville de Cologne

Une des traces actuellement la plus utilisée et notamment par la communauté SUMO est la trace sur la ville de Cologne issue du projet TAPAS-Cologne. Ce projet est une initiative de l'institut de transport au centre aérospatial allemand (Institure of Transportation Systems at the German Aerospace Center : ITS-DLR). Le simulateur SUMO a été créé également au sein de cet institut. TAPASCologne a eu pour but de reproduire avec le plus haut niveau de réalisme possible le trafic véhiculaire dans toute la ville de Cologne en Allemagne. Afin d'y parvenir différentes sources de données sur la ville ainsi que différents outils de simulation ont été réunis afin de couvrir tous les aspects nécessaires pour caractériser correctement la circulation véhiculaire (aspects sociaux, aspects véhiculaires). Une description sur la manière dont a été créée cette trace est faite dans l'article [113]. Un ensemble de 2 heures (de 6 à 8 heure du matin) de simulation est disponible au téléchargement, sur la totalité des 24 heures simulées sur une aire de 400 km2 centrée sur Cologne. Leur description de la mobilité [113] à travers cette trace montre l'impact potentiel qu'une représentation globale de la mobilité des véhicules peut avoir sur l'évaluation de la mise en place d'un réseau ITS.

Les auteurs ont effectué des tests avec cette trace, nous nous focalisons sur l'étude [114] portant sur les réseaux cellulaires en milieu urbain. Le nombre d'utilisateurs de téléphones cellulaires à bord des véhicules et les voitures en réseau qui accèdent de manière autonome aux services basés sur Internet va être en augmentation constante dans un futur proche. Les auteurs ont donc caractérisé l'accès au réseau par les véhicules d'une manière similaire à ce qui a été fait pour l'accès des piétons. Dans cet article, ils proposent une étude des caractéristiques macroscopiques et microscopiques de l'accès des véhicules au réseau à large échelle et en présence d'ensembles de données réalistes sur la circulation routière et sur le déploiement des RANs (Radio Access Network). Le déploiement réel de l'infrastructure d'accès cellulaire dans la région de Cologne est ainsi récupéré à partir d'une base de données, ceci représente 247 stations de base d'un opérateur de télécommunication mobile. Pour se rapprocher de la couverture de ses stations de base, ils utilisent le diagramme de Voronoï. Une telle approche est couramment adoptée dans le contexte de la téléphonie mobile pour l'analyse du trafic de données. Ainsi , grâce à ce diagramme, la ville de Cologne est divisée en un réseau de cellules. Leurs résultats leur permettent de conclure que les temps inter-véhiculaires d'arrivées des utilisateurs au niveau de ces cellules suivent une distribution hybride Weibull-Pareto. Ils affirment que des tests dans différents environnements urbains sont nécessaires pour accorder une validité générale au résultat, nous avons donc grâce à l'échelle moyenne du rond-point appuyé la validité de leur résultat. En effet nos données réelles ont souligné cette distribution hybride Weibull-Pareto. De plus, leurs résultats et les nôtres sur le rond-point complexe sont suffisants pour invalider l'hypothèse commune que les arrivées des utilisateurs suivent un processus de Poisson.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

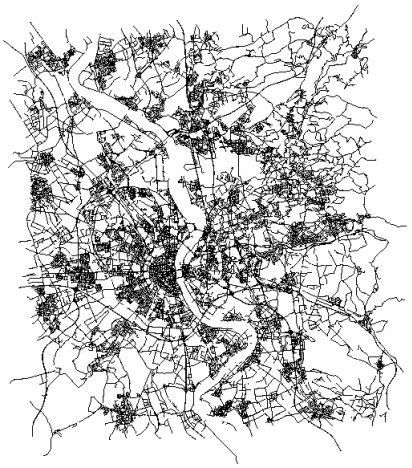

FIGURE 3.27 – Ville de Cologne dans le simulateur SUMO

Autres traces.

Des traces sur la ville du Luxembourg sont aussi disponibles [28]. D'autres scénarios du monde réel sont construits dans le projet COLOMBO. Enfin une trace est disponible sur la ville de Bologna [12].

3.4 Conclusion

Ce chapitre montre que la mise en place de plates-formes réelles et réalistes permet de procéder à de multiples simulations et de les étendre à de plus larges échelles. Dans un premier temps, nous avons étudié la petite échelle qui, avec une quantité de paramètres gérables et un environnement restreint, permet d'effectuer des tests dans des conditions réelles malgré la complexité de la réalité. Cependant, l'évaluation d'un service ITS, tel que GLOSA, demande des tests au préalable sur le bon fonctionnement du système utilisé. Par conséquent, les tests sur l'autoroute A41 ont permis de valider le système de communication Co-Drive (dans des conditions météorologiques dégradées) et les tests d'interopérabilité (FOTsis), grâce au respect des normes imposées dans les ITS actuellement, ont mis en évidence la validité du projet à l'échelle européenne. Tous ces essais sur site avaient donc pour objectif de vérifier le bon fonctionnement du système complet, afin d'anticiper un déploiement. Ceci nous a permis de mettre en place et d'expérimenter GLOSA. Les tests de ce service sur le circuit de Mortefontaine, suivis des simulations, ont montré les similitudes entre les données théoriques et les données pratiques, validant ainsi le modèle de simulation utilisé. La petite échelle permet donc de manipuler, à la fois la simulation et le réel, en ajustant correctement les paramètres permettant ainsi des interprétations justes des résultats.

Dans un deuxième temps, nous avons effectué le même procédé sur une échelle plus grande. Mais cette dernière est plus difficile à étudier, la quantité de données et de paramètres sont beaucoup plus importants, rendant le passage du réel à la simulation plus complexe. Cependant,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

la possession des données réelles, pour effectuer des tests et des simulations de système ITS, est essentiel pour interpréter les résultats correctement. La simulation du rond point d'Europarc à Créteil, montre ainsi que des flux véhiculaires, des topologies de terrain et la programmation de feux de circulation, faux ou artificiels, peuvent donner des résultats (et des propriétés) très variées. Ces derniers pouvant être éloignés du comportement réel des véhicules. Les modèles classiques, en particulier, échouent dans la similitude avec les flux réels des véhicules dans le rond-point. Néanmoins, nous avons montré que le modèle hybride Weibull-Pareto correspond bien aux intervalles d'arrivées des véhicules. Pour conclure, même si certains modèles de mobilité peuvent permettre de pointer des caractéristiques précises dans certains contextes, il ne faut pas négliger l'importance d'avoir des données réelles du trafic véhiculaire. Nous avons mis à disposition la trace synthétique réelle que nous avons produit sur le rond-point, à la disposition de la communauté sur le site web http ://vehicular-mobility-trace.github.io/.

Enfin, tout comme à la moyenne échelle, la trace réelle synthétique de la ville de Cologne présentée dans l'article [113], montre l'impact d'une bonne représentation et compréhension de la mobilité véhiculaire. Nous avons appuyé leur test de micro-mobilité en invalidant la loi de Poisson pour les arrivées des véhicules, grâce à nos données collectées sur le rond-point. Nous avons également vérifié une hypothèse de micro-mobilité provenant de leur modèle de macro-mobilité, à savoir le modèle hybride Weibull-Pareto. Leurs résultats n'avaient pas encore été validés par des données réelles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 4

Prise de décision locale d'un véhicule à un feu de circulation : impact local

Nous détaillons ici le service GLOSA présenté dans le chapitre précédent à petit échelle. Nous étendons les tests à des simulations possédant du trafic véhiculaire et des topologies de terrains différentes. Nous souhaitons ainsi tester l'impact d'un tel service ayant un effet local sur une intersection.

4.1 État de l'art

Parmi les solutions existantes pour contrôler une intersection quelconque, le système centralisé de réservation est celui qui arrive à gérer au mieux les situations à forte densité véhiculaire, grâce à son mécanisme d'optimisation de la capacité de l'intersection. Actuellement ce procédé est largement utilisé dans les zones urbaines, mais il est très coûteux en termes d'équipement et d'entretien. Dans ce domaine de recherche, différents protocoles pour contrôler les intersections existent. Nous pouvons les classer en cinq groupes. Dans les quatre premiers groupes, il existe une interaction entre les véhicules et les intersections grâce à des capteurs, ou à une communication sans fil. Dans le dernier groupe, le contrôle est seulement géré par l'intersection.

- Réservation (R) : le véhicule envoie une demande de réservation en temps et en espace à l'intersection. Le serveur accepte ou non cette dernière.
- Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) : le serveur détecte des conflits et envoie l'accélération ou la décélération à respecter pour éviter la collision.
- Séquence (S) : l'intersection contrôle l'ordre de passage des véhicules en les ordonnant de manière optimale.
- GLOSA : le véhicule adapte sa vitesse en fonction des données reçues par l'intersection.
- Traffic Light Control (TLC) : les différentes phases du feu sont contrôlées par l'intersection et peuvent varier en fonction du flux réel du trafic.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Hausknecht et al [59] (R) utilisent une approche autonome : un "manager" prédit des collisions potentielles en divisant l'intersection en grille et en réservant l'espace et le temps pour chaque véhicule autonome. Quand un véhicule approche de l'intersection, il envoie sa direction désirée et l'intersection détermine quand le véhicule pourra traverser de manière sécurisée et lui renvoie la réponse. Dans l'article [79] (R), les véhicules envoient une requête à l'intersection le modèle est basé sur le protocole *premier arrivé, premier servi* [39].

Zhang et al. [131] (CACC) proposent un algorithme génétique sur des intersections n'ayant pas de feux de circulation. Il permet de représenter des informations incertaines en règles simples. Par exemple, les données comme la vitesse, le taux d'occupation sont regroupés sous des catégories simples comme : élevé, moyen, faible. Une règle peut être : si le taux d'occupation est élevé et la vitesse faible, alors une congestion est présente. L'originalité de l'article est que les auteurs considèrent à la fois des véhicules complètement autonomes et des véhicules non autonomes, par conséquent leur système est largement influencé par le comportement humain.

Tlig Mohamed et al. [109] (S) proposent une synchronisation basée sur un mécanisme de contrôle des flux de l'intersection, permettant à des véhicules autonomes de la traverser sans s'arrêter. Des agents placés à chaque intersection synchronisent les multiples flux véhiculaires en calculant les profils de vitesse. Ahamane et al. [2] (S) proposent un droit de passage affiché dans le véhicule non autonome lorsqu'il approche une intersection. Ils utilisent les réseaux de Pétri pour modéliser leur algorithme, ce dernier permet de calculer un ordre de passage des véhicules à une intersection isolée. Jia Wu et al. [128] (S) proposent une intersection ayant une communication centralisée. Leur modèle est basé sur des graphes temporels d'événements [30] pour déterminer quel est le meilleur ordre d'arrivées des véhicules. Dans la thèse [55] (S) seules les priorités entre les robots sont planifiées, c'est-à-dire l'ordre relatif de passage des véhicules dans l'intersection. Les priorités permettent une coordination pour guider les robots dans l'intersection. Une fois les priorités affectées, les robots suivent une loi de contrôle qui s'assure qu'elles soient bien respectées.

Youcef et al [130] (TLC) présentent un contrôle du feu de circulation basé sur un réseau de capteurs sans fil (WSN-Wireless Sensor Network). Ce réseau est capable de contrôler le flux du trafic sur une, voire plusieurs intersections. Les capteurs WSN ou TSN (Traffic Sensor Nodes) sont installés en bord de route et collectent périodiquement les données du trafic (vitesse des véhicules et leur longueur par exemple) qu'ils envoient à une station qui fait tourner des algorithmes. Faye et al. [44] (TLC) introduisent un algorithme appelé TAPIOCA. Cet algorithme distribué est capable de déterminer la durée du feu vert ainsi que la séquence d'un feu de circulation isolé ou d'un ensemble d'intersections proches. Ils utilisent des capteurs sans fil pour agréger des informations et les envoyer au manager de l'intersection qui va utiliser TAPIOCA. Leur solution est localement centralisée. L'article [56] se concentre sur la notion de *back pressure* appliquée au problème de contôle du trafic à des intersections avec des feux de circulation. Leur contrôle necessite seulement une estimation de la longueur des fils de voiture (sans information de direction) et des détecteurs à la ligne d'arrêt pour chaque direction possible.

Concernant l'intersection possédant un feu de circulation, beaucoup d'articles se concentrent sur le système GLOSA afin d'évaluer ses bénéfices grâce à des simulations et des tests réels. La

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

première implémentation de GLOSA est présentée par Katsaros et al. [69], et souligne les performances du système au sein d'une plate-forme ITS de coopération sur des scénarios simples. Gajananan et al. [51] utilisent GLOSA à une échelle plus grande en créant un middleware qui intègre le trafic, un réseau de communication et des comportements de conducteur différents. Ils se concentrent sur la réponse des utilisateurs. Krajzewicz et al. [72] présente GLOSA utilisé dans le cadre du projet Européen DRIVE C2X (voir le chapitre 2).

Les intersections coopératives et intelligentes, sans feu de circulation, sont prometteuses en termes d'amélioration du trafic, de rejets de CO2, mais sont peut-être un peu éloignées de la standardisation actuelle et d'un déploiement immédiat. Dans le cas d'un déploiement de ces systèmes puissants, ils seraient capable de contrôler entièrement les intersections ainsi que les véhicules, mais la question de la responsabilité en cas d'accident ou de fonctionnement erroné est encore floue. Quant aux possibilités d'un réseau de capteurs sans fil, ce sont des systèmes coûteux comparé au déploiement de systèmes sans fil en termes de matériel mais aussi de standardisation. Enfin la possibilité de système centralisé pose des problèmes en terme de sécurité en cas de problème de communication. De plus c'est une tâche difficile de traiter une telle quantité de données en temps réel. Ces différents cas doivent être étudiés minutieusement dans le cas d'un déploiement massif. Ainsi GLOSA apparaît comme un système intéressant en tant que premier pas dans les systèmes ADAS basés sur la communication V2X, avant l'arrivée des intersections et/ou des véhicules complètement autonomes. Les résultats de ce chapitre complètent ceux du chapitre précédent (section 3.1.3) sur la petite échelle. En effet nous étendons les résultats à différentes configurations de trafic et de carte.

Nous verrons que cette application basique peut réduire les émissions de CO2 ainsi que le temps d'attente.

4.2 GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory system)

Comme nous l'avons explicité dans la section 3.1.3, l'objectif de GLOSA est de proposer au conducteur une vitesse optimale afin de traverser une intersection au feu vert. Les équipements ainsi que les conditions de simulation sont les mêmes que ceux présentés dans la section 3.1.3. Nous allons montrer que le système GLOSA permet d'améliorer l'efficacité du trafic en :

- réduisant les temps d'arrêts : le confort est alors amélioré
- donnant des données permettant d'anticiper la situation future et ainsi améliorer la sécurité
- réduisant les émissions de CO2 et de consommation de carburant

De plus ce genre de système peut être étendu au cas où les feux sont tous connectés ainsi les véhicules peuvent profiter de l'"onde verte" (*Green Wave*), c'est-à-dire que tous les feux sont verts lors du passage du véhicule et ainsi le flux du trafic est continu. Ce service est très intéressant pour les véhicules d'urgence. Faye et al. [43] ont mis en place ce processus mais avec un réseau de capteur sans fil.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

4.3 Scénarios simulés

4.3.1 Circuit

Dans cette partie nous reprenons la suite de la petite échelle présentée à section 3.1.3.2 en ajoutant du trafic via la simulation sur le circuit. Notre but ici est de tester les performances de GLOSA en élargissant les contextes de simulation. Nous nous intéressons donc aux trois situations suivantes :

- les deux feux de circulation ne sont pas équipés
- un seul feu est équipé
- les deux feux sont équipés

Le premier scénario correspond à la situation sans le système GLOSA. Ensuite nous considérons différents taux d'équipement pour les véhicules en pourcentage : $[10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100]$. Dans chaque simulation, 100 véhicules entrent sur le circuit toutes les 10 secondes. Quant aux feux de circulation leur taux d'équipement est de 50% (un feu) ou 100% (deux feux). Pour chaque véhicule nous comparons la moyenne de rejet en CO2 et la moyenne du temps d'attente avec la moyenne sans le système GLOSA. Nous obtenons les graphes en 3D dans la figure 4.1 ci-dessous, qui montrent les bénéfices du système GLOSA avec du trafic véhiculaire. Nous observons une réduction de 10% en rejet de CO2 avec un taux d'équipement à 100% pour les véhicules et l'infrastructure. Et nous notons qu'avec 40% des véhicules équipés et 50% des feux équipés, une réduction de 5% en rejet de CO2 et de 30% en temps d'attente, sont observés. Ceci signifie qu'en équipant seulement la moitié du parc automobile et la moitié de l'infrastructure un gain notable est observé.

Nous remarquons que les véhicules ne s'arrêtent jamais avec un taux d'équipement à 100% pour les véhicules et les intersections, il n'y a pas de temps d'attente sur le circuit. En effet, il n'y a pas de phénomène de congestion dans ce scénario, par conséquent chaque véhicule, équipé ou non, peut bénéficier du système GLOSA. Sachant qu'avec 50% des véhicules équipés, ceux qui ne le sont pas, suivent probablement un véhicule équipé et peuvent ainsi bénéficier du système GLOSA.

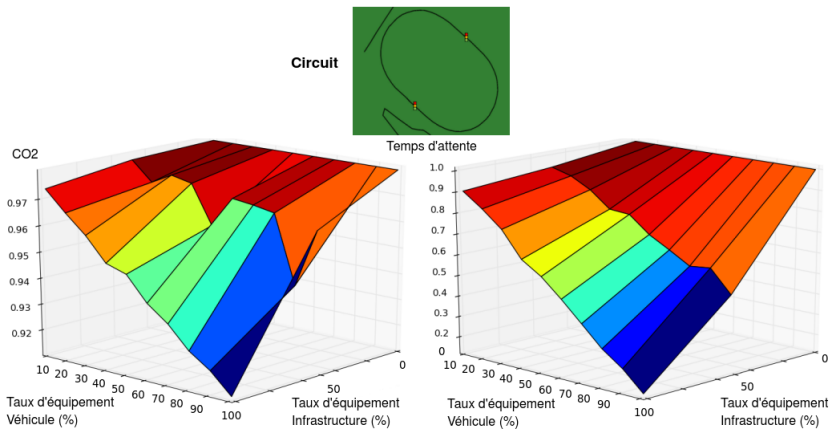

FIGURE 4.1 – Résultats pour un scénario simple avec trafic

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Les deux sections suivantes présentent deux simulations dans des environnements plus complexes. Le premier est un cas d'école, très utilisé dans la communauté véhiculaire : la grille de Manhattan. Le second est un quartier de Bobigny en France où des navettes de Valeo permettent aux employés d'effectuer le trajet entre les arrêts des transports en commun et l'entreprise Valeo.

4.3.2 Grille de Manhattan

La carte de Manhattan est une grille 5×5 avec 9 feux de circulation. La longueur entre deux feux est de 900 mètres. Dans cette simulation 200 véhicules apparaissent sur la carte à des positions aléatoires et effectuent un trajet vers une destination choisie également au hasard, selon le plus court chemin en distance, calculé par l'algorithme de Dijkstra. À chaque pas de temps un véhicule apparaît. Nous appliquons ensuite différents taux d'équipement à savoir de 0 à 100% pour les feux de circulation et de 10 à 100% pour les véhicules.

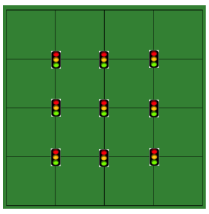

FIGURE 4.2 – Grille de Manhattan

Nous comparons la moyenne d'émissions en CO2, du temps d'attente et de parcours avec la moyenne sans le système GLOSA (voir l'axe des Z sur le graphe en 3D de la figure 4.3). Comme dans le scénario sur le circuit, la circulation n'est pas très importante, nous verrons dans la prochaine section qu'un trafic lourd a un impact sur les résultats. Notamment, l'amélioration du temps d'attente sera plus faible que sur la grille où les véhicules ne souffrent pas de variation de vitesse au cours de leur trajet.

La figure 4.3 montre qu'avec un taux d'équipement au maximum pour l'infrastructure et les véhicules, des réductions de 10.5% en CO2, 80% en temps d'attente et 2.5% en temps de trajet sont observées. Un gain maximum de 3% est observé en temps de trajet avec seulement 50% des feux de circulation équipés et 100% des véhicules. Ensuite comme dans le contexte du circuit, 40% des feux et 50% des véhicules équipés permet un gain de 6% en émissions de CO2 et 30% en temps d'attente. Ainsi les résultats sont relativement stables même si nous avons changé de milieu urbain (nous sommes passés d'un circuit à une grille). De plus ceci signifie qu'un déploiement partiel parmi les véhicules et l'infrastructure permet des résultats significatifs et souligne donc le potentiel de GLOSA. Cependant ces résultats montrent le potentiel de GLOSA dans un cas où le trafic est relativement fluide. Nous verrons dans la section suivante les performances en cas de trafic lourd.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

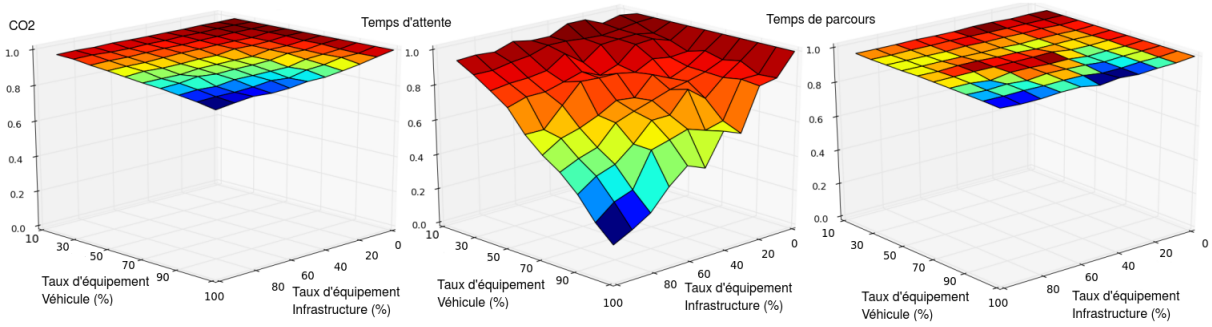

FIGURE 4.3 – Résultats sur la grille de Manhattan

4.3.3 Trajet des navettes Valeo à Bobigny

Le dernier scénario peut être considéré comme le scénario le plus proche de la réalité, en effet nous nous concentrons sur un quartier de la ville de Bobigny où des navettes Valeo effectuent le trajet entre un point proche des arrêts de transport en commun et le site de l'entreprise. La figure 4.4 représente la carte du quartier sur OpenStreetMap et la carte simulée dans SUMO, cette dernière mesure 2.7 kilomètres par 3 kilomètres, la ligne rouge correspond à la distance parcourue par les navettes dans les deux directions. Nous considérons ici différentes densités de trafic véhiculaire pour étudier l'impact sur le système GLOSA. Comme dans les simulations précédentes nous appliquons différents taux d'équipement : de 0 à 100% pour les feux de circulation et de 10% à 100% pour les véhicules (les navettes sont comprises dans les véhicules).

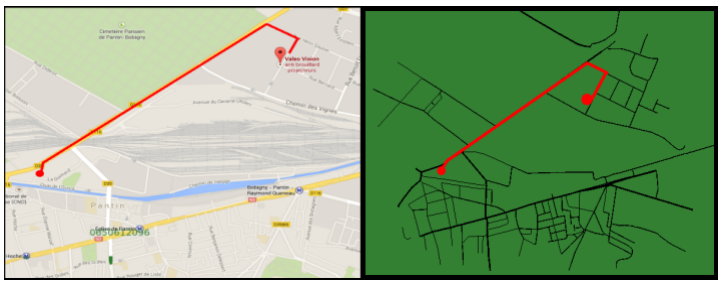

FIGURE 4.4 – Trajet des navettes dans le quartier de Bobigny

Dans chacune des simulations, des navettes partent dans chaque direction (Valeo ⇔ Arrêt transport) pendant 600 secondes. Par exemple, dans le cas d'une faible densité véhiculaire, deux navettes (une dans chaque direction) partent toutes les 200 secondes durant 600 secondes, il y a donc 6 navettes. Puis nous ajoutons des véhicules sur le même trajet que les navettes (Valeo ⇔ Arrêt transport) et enfin nous en ajoutons de manière aléatoire sur le reste du quartier. Le tableau 4.5 détaille les paramètres utilisés, nous avons donc 154 véhicules pour une faible densité (L : Low), 309 véhicules pour une densité moyenne (M : Medium) et 512 pour une forte densité (H : High).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Lieu	Type	Durée (s)	Frequence (s)			Nombre		
			L	M	H	L	M	H
Site Valeo ⇔ Arrêt transport	Navettes	600	200	100	50	6	12	24
Site Valeo ⇔ Arrêt transport	Véhicules	600	60	30	15	20	40	80
Au hasard sur la carte	Véhicules		1	1	1	128	257	408
	Total					154	309	512

FIGURE 4.5 – Paramètres de simulation avec différentes densités véhiculaires : faible (L : Low), moyenne (M : Medium) et forte (H : High)

Les résultats sont présentés dans la figure 4.6

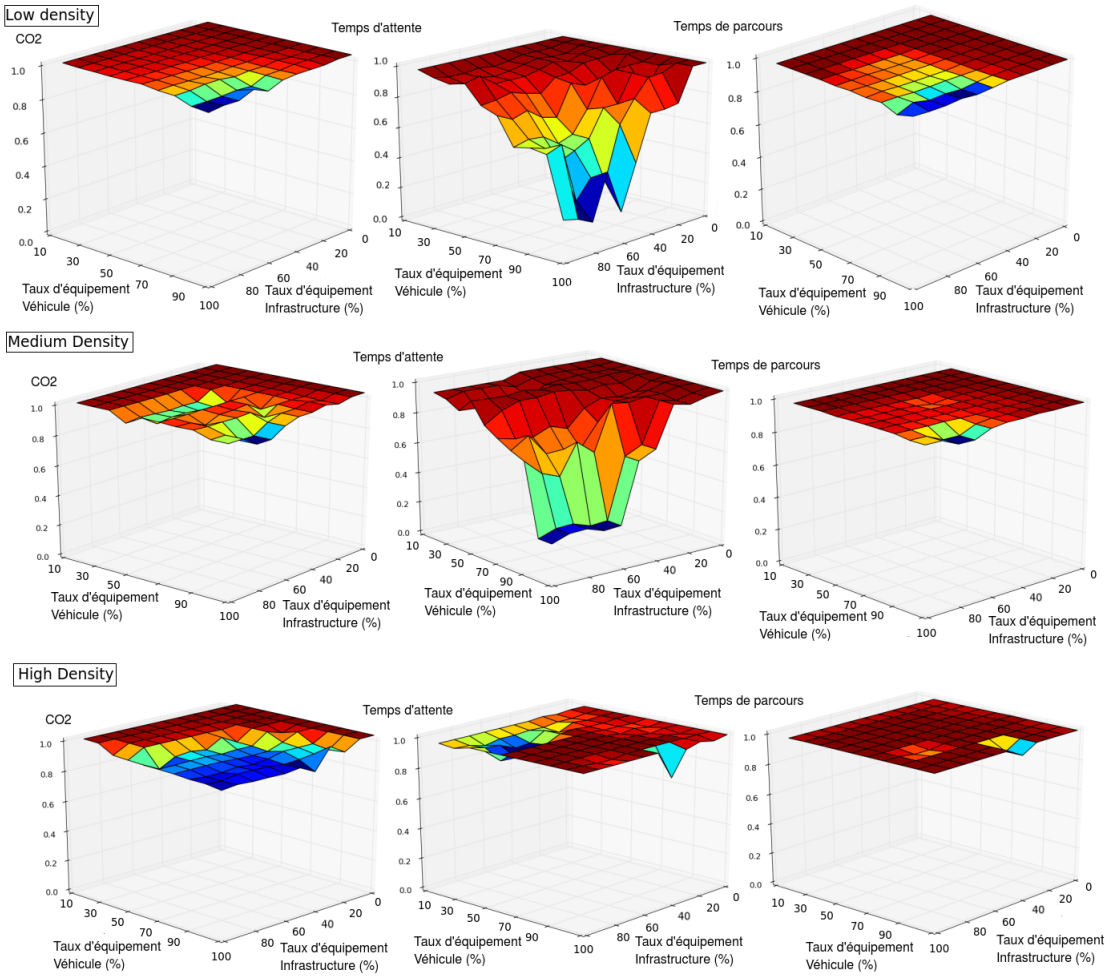

FIGURE 4.6 – Résultats sur le quartier de Bobigny

Temps de parcours. Une fois que quelques véhicules sont équipés, une réduction autour de 1% est observée en temps de parcours pour une faible densité. Cette amélioration n'évolue que

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

jusqu'à 1.95% pour 100% des véhicules équipés et 60% des feux de circulation. La circulation est fluide en cas de faible trafic et une amélioration du temps de parcours n'est pas significative. En revanche, une amélioration de 2.05% en temps de parcours est observée avec seulement 50% des véhicules et de l'infrastructure équipés pour une circulation moyenne. Dans le cas d'un trafic lourd, une amélioration de 5.6% est observée avec 90% des véhicules équipés et 40% des intersections ainsi qu'une réduction de 1.3% avec 70% d'équipement. Aucune amélioration n'apparaît dans les autres cas. Eckhoff et al. [40] ont montré que dans le cas d'un trafic dense, les performances de GLOSA sont détériorées avec des temps de parcours et des temps d'attente longs et des arrêts fréquents. En effet dans un trafic dense, une vitesse optimale pour un véhicule peut perturber et détériorer la vitesse optimale des autres véhicules.

Temps d'attente. Dans les cas de faible et moyenne densité, le temps d'attente diminue considérablement en fonction du taux d'équipement : avec une réduction de $16,5\%$ avec 50% des véhicules et 60% des feux de circulation équipés à faible densité et une réduction de 32% avec 70% des véhicules et 60% des feux équipés en cas de moyenne densité. Quant à la situation avec une forte densité, le temps d'attente à une diminution faible (autour de 2%) avec un équipement à 100%. Seules deux valeurs font exception : avec 40% des véhicules et 80% des intersections, il y a une réduction de $8,9\%$; et avec 100% des véhicules et 40% des intersections, il y a une réduction de $18,17\%$.

Émissions de CO2. La réduction de CO2 en cas de faible densité est faible voire négative avec un faible taux d'équipement. Le gain devient positif avec 90% d'équipement pour les véhicules et les infrastructures ($1,88\%$ de réduction). En revanche avec la moitié des véhicules et des feux de circulation, une amélioration est observée dans le cas d'une densité véhiculaire moyenne. Enfin des réductions de $4,5\%$ et de 10% sont observés avec 70 et 100% des véhicules équipés respectivement et 50 et 40% des intersections équipées respectivement.
Le tableau 4.7 ci-dessous présente les taux d'équipement optimaux pour tous les véhicules afin d'obtenir le maximum de gain dans chaque catégorie de trafic véhiculaire : faible (L), moyen (M) et fort (H). Nous remarquons qu'un équipement de 40% pour les feux de circulation est suffisant dans le cas d'un fort trafic, cependant les résultats en temps d'attente diminuent considérablement.

	Equipement véhiculaire (%)			Equipement des intersections (%)			Réduction maximale (%)		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Temps de parcours	100	90	90	100	100	40	1.03	3.89	5.66
Temps d'attente	90	100	100	40	80	40	20.95	82.45	18.17
CO2	100	100	100	60	100	40	10.41	8.60	13.27

FIGURE 4.7 – Taux d'équipement pour obtenir une réduction maximale dans les trois catégories (pour tous les véhicules)

Ensuite nous nous concentrons sur les résultats des navettes exclusivement, le tableau 4.8 présente les taux d'équipements pour tous les véhicules et infrastructure nécessaires pour obtenir

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

les meilleurs gains dans les trois catégories étudiées pour les navettes, à savoir le temps de parcours, le temps d'attente et les émissions de CO2.

	Equipement véhiculaire (%)			Equipement des intersections (%)			Réduction maximale (%)		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Temps de parcours	70	80	40	70	50	20	1.05	0.81	0.73
Temps d'attente	70	100	100	60	60	70	76.47	97.72	64.41
CO2	100	100	100	60	90	50	26.80	7.96	26.97

FIGURE 4.8 – Taux d'équipement (véhicules et infrastructure) pour obtenir une réduction maximale dans les trois catégories (pour les navettes).

Pour toutes les densités, le temps de parcours n'est que faiblement amélioré, cependant le temps d'attente s'améliore considérablement en fonction du taux d'équipement de tous les véhicules et de l'infrastructure. Il est important de souligner que le taux d'équipement inclut les navettes, donc il est fort probable que certaines navettes ne soient pas équipées, cependant elle profite du système GLOSA. En effet avec des taux d'équipement supérieurs à 30% pour les véhicules des résultats positifs apparaissent pour les navettes.

4.4 Conclusion

Nous avons testé dans le chapitre précédent, une application simple des ITS (GLOSA), en conditions réelles et en simulations, à petite échelle. Dans ce chapitre, nous avons étendues ces simulations (circuit avec trafic, grille et carte réelle). Dans nos résultats, GLOSA peut réduire le temps d'attente mais également la consommation en carburant et donc les rejets en CO2. Les performances ne dépendent donc pas de la topologie du terrain. De plus, GLOSA a un impact sur des véhicules non équipés car ces derniers sont influencés par les décisions prises par les véhicules communicants qui les entourent. Ils peuvent alors bénéficier de GLOSA sans pour autant avoir le dispositif nécessaire. Lorsque le parc automobile et les feux de circulation commencent à être équipés à hauteur de 50% environ, des résultats encourageants apparaîssent dans chaque scénario testé.

Cependant, une critique peut être appliquée à nos simulations d'après notre chapitre 3 sur la méthodologie. Nous avons montré précédemment, qu'à une échelle moyenne, les interprétations des résultats sont fortement liées à la fidélité des données avec le réel. D'une part, les résultats de la grille de Manhattan permettent seulement de se faire une idée du potentiel de GLOSA (cas d'école). D'autre part, les simulations sur les navettes de Valeo devront être améliorées par une approche réelle du trafic, afin de confirmer nos résultats. Il serait aussi pertinent d'étudier la coopération des feux de circulation ainsi que l'expérience de l'utilisateur et son acceptation de ce genre de système. Enfin l'impact du trafic sur GLOSA doit être approfondi. Effectivement, nous avons montré que sur un trafic normal GLOSA avait un impact significatif, mais qu'en cas de congestion les performances déclinaient. Par exemple, un système de "pause" pourrait être appliqué aux feux équipés, si la densité véhiculaire dépasse un seuil où GLOSA ne peut plus être efficace.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 5

Prise de décision locale de n véhicules dans un rond-point : impact local

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les intersections sont considérées comme des endroits de congestion impactant le temps de trajet et dépensant de nombreuses ressources. Ce problème est largement étudié dans le contexte des ITS à travers des coopérations entre les véhicules, des interactions avec l'infrastructure ou encore des décisions de véhicules autonomes. Dans ce chapitre nous nous concentrons sur la communication entre les véhicules (V2V) sans interaction avec l'infrastructure sur une intersection complexe : un rond-point. Nous supposons que les véhicules ne sont pas autonomes et sont contrôlés par des conducteurs. Avec cette hypothèse, nous ne prétendons pas prendre le contrôle des véhicules, ni éviter les collisions à tout prix ou améliorer la sécurité, comme c'est le cas dans la majorité des travaux sur les intersections [33], [67], [8]. Ici, nous éliminons les conflits éventuels entre les trajectoires des véhicules venant de toutes les directions grâce à un algorithme simple. Nous souhaitons démontrer le potentiel de la communication entre les véhicules dans un rond-point, pourtant complexe. Dans ce chapitre nous ne considérons pas seulement les performances véhiculaires mais nous testons également la sensibilité du réseau de communication de ce système. Nous utilisons les données réelles présentées dans la section 3.2 sur le rond-point Europarc à Créteil en France.

5.1 État de l'art

Actuellement, les intersections sont gérées par des stops ou des feux de circulation pour améliorer la sécurité, parmi elles, les rond-points sont considérés comme étant plus sûrs. Cependant, il existe un intérêt grandissant sur l'efficacité et la sécurité de ces intersections. Les délais dus aux arrêts ou aux feux rouges augmentent de manière significative le temps de parcours. Les ITS permettent d'imaginer des solutions pour traverser une intersection ou un rond-point de manière plus efficace. Nous avons vu un état de l'art du contrôle des intersections au chapitre

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

précédent, ces derniers sont centralisés mais le système de contrôle de l'intersection peut être aussi décentralisé. Par exemple, si un véhicule n'a pas le droit de passer, il peut envoyer une requête aux autres véhicules et négocier son passage [5]. Dans ce modèle le véhicule peut être amené à s'arrêter contrairement au modèle centralisé. Javier Alonso et al. [4] proposent une coopération aux niveaux des manoeuvres entre des véhicules équipés de capteurs, que se soit des véhicules autonomes ou non. Gabriel Rodrigues et al. [33] présentent un modèle d'évitement de collision avec une coordination entre les véhicules, basée sur le degré de liberté disponible de chaque véhicule pour éviter la collision.

Dans ce chapitre nous présentons donc un modèle décentralisé basé sur la communication V2V, afin d'anticiper les entrées des véhicules dans le rond-point.

5.2 Modèle V2V de fluidification

5.2.1 Détecter et résoudre un conflit

Dans notre modèle, nous supprimons les feux de circulation du rond-point (voir la section 3.2), nous ne gardons que les feux de piétons. La figure 5.1 rappelle la configuration du rond-point avec une route prioritaire traversant le rond-point pour les bus ou les véhicules d'urgence.

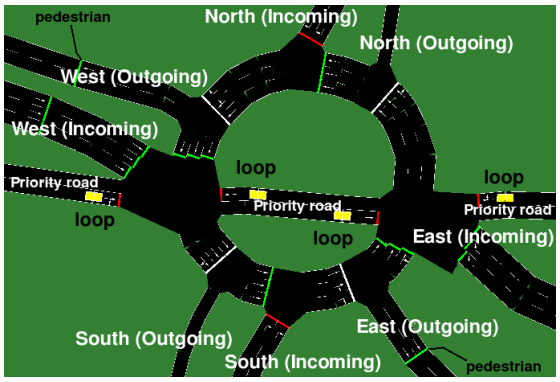

FIGURE 5.1 – Liens entrants et sortants du rond-point

Notre système apporte une recommandation de vitesse aux véhicules pour qu'ils puissent s'insérer de manière fluide dans le rond-point. Le temps est discret exprimé en seconde et les distances sont exprimées en mètres. Grâce à la communication V2V les véhicules envoient des *Listes de Temps* (TL) aux autres véhicules qui leur permet de détecter des conflits et de les résoudre en fonction de certaines règles de priorité. Les différentes étapes sont présentés dans l'algorithme 1 applicable à tous les véhicules équipés d'un dispositif de communication sans fil.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

```
   Result: Vehicle's movement
1  v, a vehicle;
2  [0, N], intersections in the roundabout;
3  i ∈ [0, N], first intersection crossed by v;
4  a random int ∈ [0, 1], Proba probability to test a conflict;
5  if v approaches the roundabout then
6  |  Initialisation(TL_v);
7  |  while v is outside the roundabout do
8  |  |  Send(TL_v, Speed(v), Length(v), Type(v));
9  |  |  if type(v)≠ Priority and a < Proba then
10 |  |  |  Detect Conflict in i;
11 |  |  |  if Conflict is detected then
12 |  |  |  |  Run CR;
13 |  |  |  else
14 |  |  |  |  Continue and Cross the Roundabout
15 |  while v is inside the roundabout do
16 |  |  Send(TL_v, Speed(v), Length(v), Type(v));
17 |  |  if type(v)≠ Priority and a < Proba then
18 |  |  |  i ∈ [0, N], next intersection crossed by v;
19 |  |  |  Detect Conflict in i;
20 |  |  |  if Conflict with priority road is detected then
21 |  |  |  |  Run CR;
22 |  |  |  else
23 |  |  |  |  Continue and Cross the roundabout
```

Algorithm 1: Modèle V2V de fluidification

La vitesse d'un rond-point dans l'absolu est de 13.89 m/s (50 km/h), cependant ce genre de recommandation de vitesse est difficilement acceptable pour un conducteur, ainsi nous limitons la vitesse du rond-point à 8.5 m/s (28.8 km/h). L'algorithme présenté est général, nous le réduisons à notre cas d'étude : le rond-point Europarc de Créteil en France. Ainsi il possède $N = 4$ intersections que nous notons w pour l'Ouest (West), s pour le Sud, e pour l'Est et n pour le Nord. $[w, s, e, n]$ est la liste des quatre intersections du rond-point, nous les appellerons également des cellules. Chaque véhicule v a une *Liste de Temps* : TL_v, décrivant le moment de passage du véhicule à chaque intersection, ainsi $TL_v = [t_w, t_s, t_e, t_n]$. Quand un véhicule arrive proche du rond-point, il initialise TL_v (ligne 5). Cette initialisation utilise la vitesse actuelle du véhicule et sa position. En utilisant la distance euclidienne, le véhicule possède alors une approximation de ses temps d'arrivées à chaque intersection $[w, s, e, n]$, du rond-point. Ce qui suppose alors que la vitesse du véhicule reste constante jusqu'à son arrivée au rond-point. *Detect Conflict* à la ligne 9 utilise toutes les informations envoyées en broadcast par tous les autres véhicules autour. Cette fonction utilise TL_y des véhicules émetteurs y et TL_v du véhicule v. *Detect conflict* compare alors les listes et détermine s'il existe un intervalle de temps trop court entre deux temps des deux listes comparées, sur une même cellule (w, s, e ou n) traversée par les deux véhicules en question (voir la figure 5.2). Cet intervalle de temps correspond à l'espace nécessaire pour un véhicule pour s'insérer avant ou après un autre véhicule (autour de 2.2 secondes [21], voir la section 5.2.3.1). Si un conflit éventuel est détecté par la fonction *Detect Conflict*, l'algorithme fait tourner la fonction *Conflict Resolution* (CR), qui consiste à recommander une accélération si cela est possible (vitesse maximale autorisée) ou une décélération, une mise à jour de TL_v est alors effectuée. Si plusieurs conflits sont détectés et que le véhicule ne peut pas accélérer (vitesse autorisée maximale), CR choisit la décélération minimale parmi les conflits détectés. La figure 5.2 illustre le scénario où deux cellules sont communes aux voyages du véhicule A et du véhicule B. Une collision peut se produire sur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

la cellule s, nous appliquons le protocole *premier arrivé, premier servi*, ainsi le véhicule A sera le premier dans le rond-point, donc le véhicule B va détecter une collision et fera tourner *Conflict Resolution*. De l'autre côté du rond-point, le véhicule C n'a détecté aucun conflit et peut continuer son trajet et traverser le rond-point.

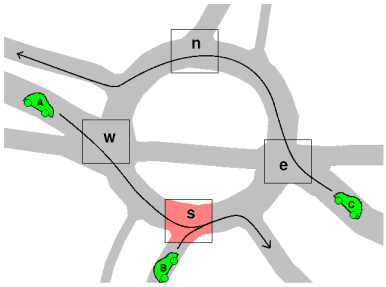

FIGURE 5.2 – Exemple de conflits

5.2.2 Règles de priorité

Les véhicules suivent la règle du *premier arrivé, premier servi* dans laquelle le véhicule ayant le temps d'arrivée le plus petit au rond-point, obtient la priorité [7]. Ainsi les véhicules qui entrent dans le rond-point ont la priorité sur ceux se trouvant à l'extérieur. Quant aux bus ainsi que tous les autres véhicules d'urgence se trouvant sur la route prioritaire (voir la figure 5.1), ils ont la priorité sur les véhicules se trouvant à l'intérieur du rond-point. La seconde partie de l'algorithme (ligne 14) se concentre sur cette situation, ainsi les véhicules dans le rond-point doivent ralentir quand des véhicules d'urgence ou des bus arrivent sur la route prioritaire. Ce scénario est illustré sur la figure 5.3, où le bus C se trouve sur la route prioritaire, les véhicules A et B détectent alors un conflit avec ce bus et doivent utiliser CR. Pour résumer, voici les règles de priorité en ordre décroissant :

- véhicule sur la route prioritaire
- véhicule à l'intérieur du rond-point
- véhicule proche du rond-point
- véhicule à l'extérieur du rond-point

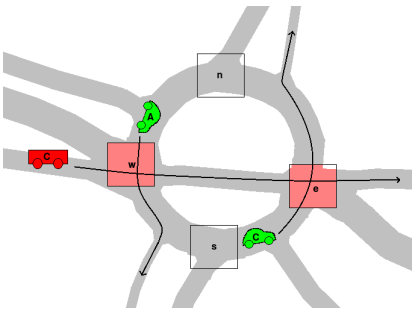

FIGURE 5.3 – Exemple d'application de la priorité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

5.2.3 Contraintes

5.2.3.1 Distance de sécurité

Dans notre modèle, les *Listes de temps* changent au fur et à mesure que le véhicule approche du rond-point et qu'il résout des conflits. La mise à jour de TL contient alors des nouveaux temps pour chaque cellule lorsque des conflits sont détectés et résolus. Ceci peut amener une boucle infinie, avec des accélérations et des décélérations en continue jusqu'à ce que le véhicule arrive au rond-point. Cependant, dans notre modèle, les véhicules ne s'arrêtent pas à l'approche du rond-point, ainsi la distance de sécurité est respectée en amont et permet de résoudre les conflits, le phénomène est ainsi absorbé en limitant la propagation des conflits.

Ensuite, la fonctionnalité d'un rond-point est directement lié à l'habilité des conducteurs à y entrer en choisissant un espace approprié dans le flux du trafic. Cet espace critique se réfère à l'espace minimal que le conducteur accepte si il est suffisant, ou rejette si il est trop court. Les auteurs de l'article [21] ont étudié cet espace critique et ont déterminé une valeur fiable permettant d'améliorer le design des futurs rond-points. Cette valeur est en moyenne de 12.8 mètres en espace et 2.2 secondes en temps. SUMO inclut la distance de sécurité entre les voiture selon le modèle de Krauss [74]. Comme les véhicules dans le rond-point ont la priorité, il peuvent suivre la vitesse de 8.5 m/s, et donc la distance entre chaque véhicule est de 20 mètres, soit 2.5 secondes. Ainsi l'espace critique est respecté et permet aux véhicules de rentrer dans le rond-point et d'achever leur insertion correctement. Ceci est, bien entendu, remis en question en cas de densité excédant la capacité physique du rond-point.

5.2.3.2 Localisation géographique

Notre système nécessite la connaissance géographique du rond-point. Chaque véhicule connaît sa position et celle de chaque intersection. Donc un système de localisation est nécessaire. Nous émettons l'hypothèse que tous les véhicules ont accès à cette information. Ceci est réaliste, car les dispositifs disponibles pour les communications véhiculaires possèdent tous un GPS embarqués. Cependant si ce dernier n'est pas disponible, il existe des solutions comme celle présentée dans l'article [50] où les auteurs proposent un système coopératif pour évaluer les positions des véhicules dans la situation où certains véhicules n'ont pas de GPS. Les dispositifs actuels les plus connus sont : WAAS (Wide Area Augmentation System), EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) et DGPS (GPS différentiel). Les GPS standards ont une précision de 15 mètres pouvant aller jusqu'à 3 à 5 mètres avec le DGPS et le WAAS. Le concurrent du GPS, GLONASS, a une précision de 5 à 6 mètres. Dans notre modèle, chaque véhicule base sa distance de sécurité sur une erreur de position, ceci augmente la distance tampon entre les véhicules et permet à ces derniers de ralentir en sécurité si le leader doit ralentir de manière brutale. Ensuite quand le véhicule calcule sa *Liste de Temps*, nous rajoutons $1s$, ce qui représente une marge de 5 à 14 mètres (selon la vitesse : entre 20 et 50 km/h, à l'extérieur du rond-point).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

5.3 Simulations et résultats

5.3.1 Environnement et hypothèse

Dans un premier temps, nous considérons que tous les conducteurs respectent le modèle et que tous les véhicules possèdent un dispositif de communication. Nous utilisons les données du soir de 17 heures à 19 heures, ce qui représente environ 5000 voyages. Nous nous comparons donc aux données réelles présentées dans la section 3.2 du chapitre 3, où les feux de circulation fonctionnent selon un programme fidèle à la réalité. Les deux feux réservés aux piétons sont conservés dans nos simulations.

5.3.2 Impact de notre modèle

Pour ces premiers résultats, nous nous concentrons sur le taux d'occupation des routes suivantes : Ouest, Est, Sud et Nord (voir la figure 5.1). Nous comparons notre modèle avec le scénario réel avec les feux de circulation (voir 3.2). Comme nous pouvons le voir dans la figure 5.4, le taux d'occupation pour les liens sortants sont similaires dans les deux situations. Ensuite pour les liens entrants, les résultats sont meilleurs avec notre modèle. Les véhicules ne s'arrêtent pas à l'entrée du rond-point ainsi il n'y a pas d'accumulation des véhicules.

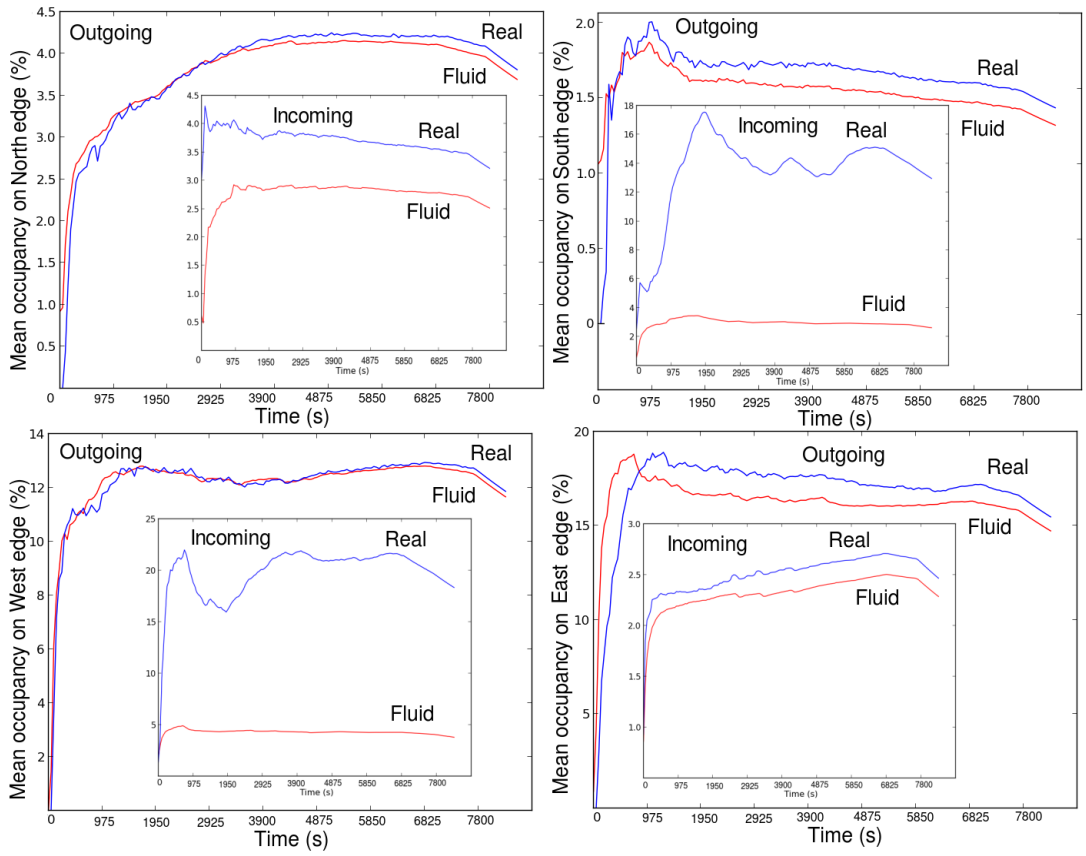

FIGURE 5.4 – Taux d'occupation des liens entrants et sortants du rond-point

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

De plus, les véhicules ne s'arrêtant pas, le temps d'attente est considérablement réduit, voir la figure 5.5 avec une différence de $30s$. Cette valeur correspond, en moyenne, à une attente à un feu de circulation. Ce temps d'attente affecte le temps de parcours avec une différence de $57s$ entre le temps de parcours du système en place dans la réalité et notre modèle. Cette durée peut paraître négligeable mais elle ne l'est pas lorsque l'on prend la totalité d'un trajet quotidien pouvant comprendre plusieurs rond-points.

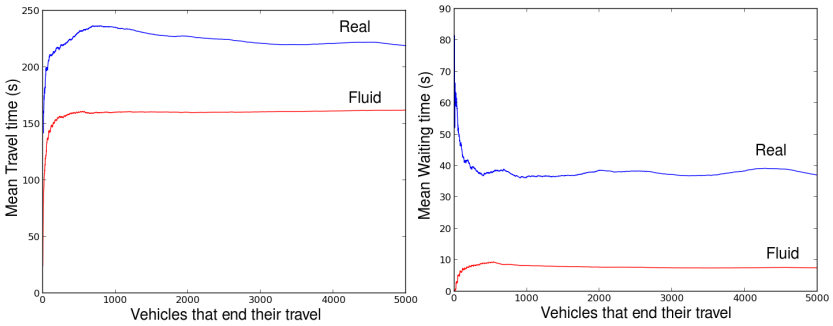

FIGURE 5.5 – Moyennes en temps de parcours et d'attente

Nous nous intéressons également au temps pour traverser le rond-point de son entrée à sa sortie exactement, il est de 29.5 secondes en moyenne dans le scénario réel et 11.8 secondes avec le modèle de fluidification. Ensuite, si nous prenons en compte le moment où les véhicules sont capables de communiquer, le temps moyen de traversé est de 86.5 secondes dans le cas réel et 43.5 secondes avec notre modèle. Le gain est donc aussi en amont du rond-point.

La figure 5.6 représente le nombre de véhicule en fonction de leur temps d'attente et de leur temps de parcours sur la carte entière, dans le cas réel et avec notre modèle. La moyenne en temps de parcours est de 162.02 secondes contre 219 secondes dans le cas réel, avec un maximum de 278 secondes contre 472 secondes. Ensuite, le temps d'attente moyen est de 7.51 secondes contre 37 secondes, avec un maximum de 56 secondes contre 185 secondes dans le cas réel. Notre modèle surpasse en gain de temps, le cas réel comportant des feux de circulation pourtant adaptatifs. De plus la répartition est équitable entre les véhicules, il n'y a pas de phénomène de famine qui se crée (cas où un véhicule attend indéfiniment avant de pouvoir s'insérer).

La figure 5.7 montre la moyenne cumulée d'émissions de CO2 en mg/s et de consommation de carburant en ml/s. Dans la simulation de la micro-mobilité de la section 3.2, aucune information n'est disponible sur le type de véhicule traversant le rond-point en terme de consommation de carburant et d'émissions de CO2. Pour avoir une idée de la consommation, nous utilisons les valeurs par défaut de SUMO. L'émission de polluant et la consommation de carburant sont implémentés via un modèle continue dérivé des données disponibles dans la base de donnée HBEFA. Cependant SUMO considère qu'un véhicule à l'arrêt ne consomme pas et ne rejette

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

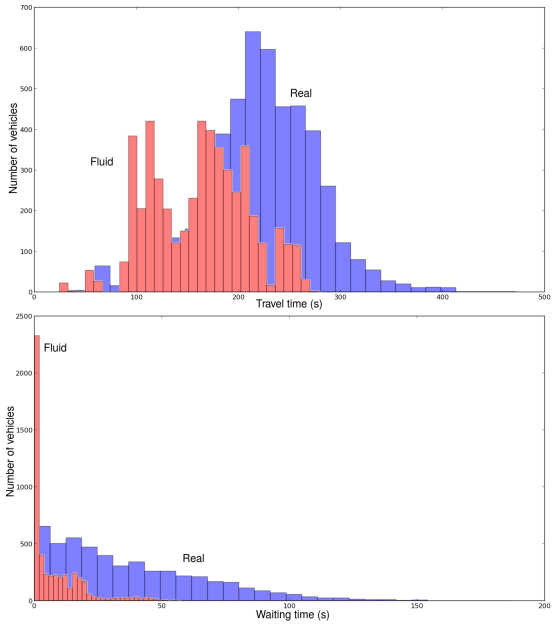

FIGURE 5.6 – Histogrammes des temps de parcours et des temps d'attente

rien. En réalité, lorsqu'un véhicule est à l'arrêt (aux feux ou dans les bouchons), le moteur tourne au ralenti (600 rpm) et la consommation en carburant est mesurée à 0.8 l/h [22]. Sachant que 1 litre de carburant consommé représente en moyenne $2320g$ de CO2, un véhicule à l'arrêt émet donc 1856 g/h, nous utilisons cette valeur dans la simulation.
Sur figure 5.7, les émissions de CO2 et la consommation sont linéairement liés ainsi leurs profils sont similaires. Les résultats dans le cas réel et avec notre modèle sont similaires, la différence est faible avec 11% en consommation de carburant et 10% en émissions de CO2 en faveur de notre modèle. Cependant, ces résultats sont à nuancer avec des études récentes [101], [115], qui ont montré que la pollution essentiellement émise proviendrait du freinage. L'implémentation de cette information dans le modèle d'émission pourrait être intéressante mais les données sont difficilement accessibles.

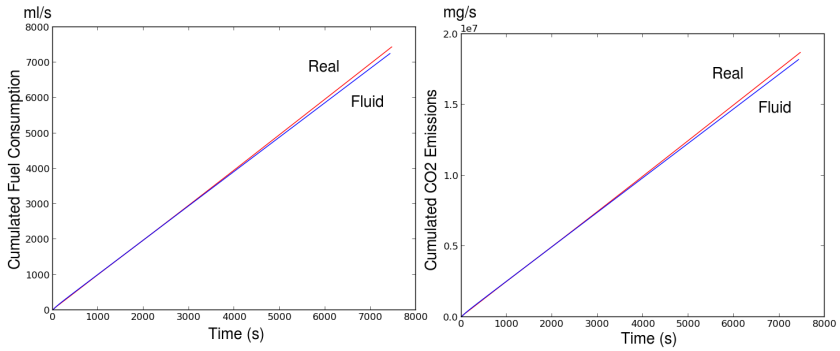

FIGURE 5.7 – Émissions de CO2 et consommation de carburant cumulés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Maintenant nous nous concentrons sur les profils des vitesses entre $17h05$ et $17h35$ (figure 5.8), des véhicules circulant seulement sur les flux les plus importants à savoir : du Nord à l'Ouest, du Sud à l'Ouest, de l'Est à l'Ouest et enfin de l'Ouest à l'Est. Les profils de vitesse sont plus uniformes avec notre modèle. Par exemple, les véhicules entrant par la route de l'Ouest traversent le rond-point rapidement (premier creux) puis s'arrêtent au feu piéton se trouvant sur la sortie Est (second creux). Sur l'ensemble des graphes, ils traversent le rond-point plus doucement mais en sortent plus vite que dans la réalité. Les profils de vitesse dans le cas réel sont très irréguliers car certains véhicules s'arrêtent aux feux rouges et d'autres non.

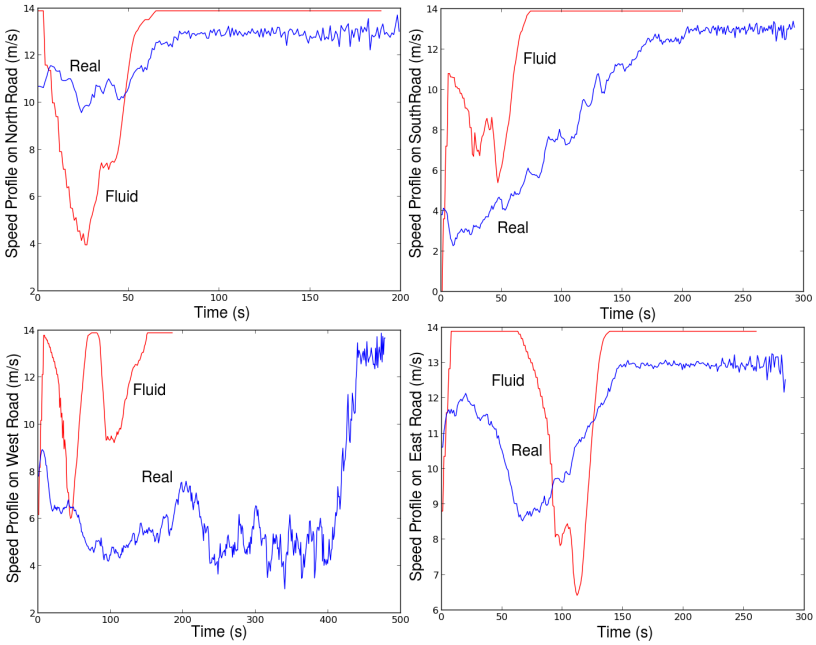

FIGURE 5.8 – Profils des vitesses des liens entrants en m/s

5.3.3 Comparaison avec deux autres modèles

Nous nous comparons à deux autres modèles, un modèle de réservation et un de négociation. Le premier est centralisé avec l'intersection qui gère le passage des véhicules en calculant la séquence de passage optimale comme dans l'article [65]. Le second est décentralisé [129], où les véhicules négocient leur droit de passage. De plus, si un véhicule est assez proche de celui de devant, qui lui a obtenu le droit de passage, alors il l'obtient aussi ; sinon il doit négocier avec les autres véhicules et le plus proche du rond-point obtient le droit de passage.
Notre modèle V2V obtient des résultats en temps de parcours proche du modèle de négociation (voir la figure 5.9) avec une différence de 2.10%. Nous notons une différence de 9.84% avec le modèle centralisé. Ensuite pour le temps d'attente notre modèle est proche à 2.5% de la solution centralisée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

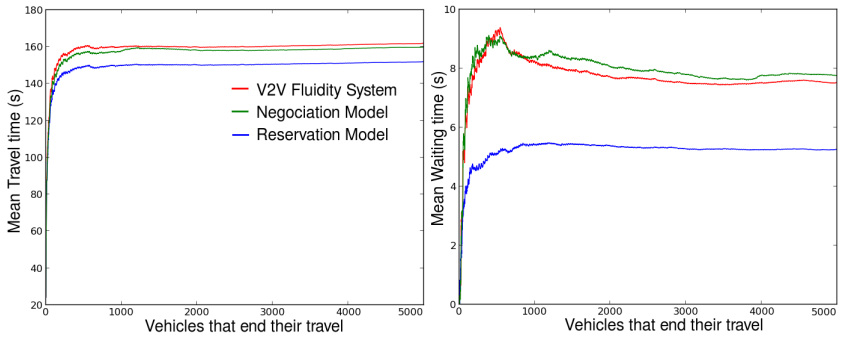

FIGURE 5.9 – Comparaison avec un modèle centralisé (réservation) et décentralisé (négociation)

Le tableau 5.1 résume le temps passé dans le rond-point et celui pour le traverser (du moment où les véhicules reçoivent les données au moment où ils ne les reçoivent plus). Notre modèle gagne en moyenne $1.2s$ dans le rond-point mais en perd $1.4s$ pour la traversée à partir de la réception des données, par rapport au modèle de négociation. Mais les résultats sont proches du modèle centralisé de réservation. Contrairement au modèle de négociation, les véhicules, dans notre modèle, ne dépendent pas des autres véhicules pour pouvoir traverser, un contrôle individuel donne donc de résultats similaires.

Model	V2V Model	Negociation	Reservation
Time spent in the roundabout (s)	11.80	12.97	7.70
Time to cross the roundabout (s)	43.5	42.10	34.75

TABLE 5.1 – Temps passé dans le rond-point, temps passé pour la traversée selon les différents modèles

Enfin, la figure 5.10, montre que notre modèle surpasse les deux autres en termes de complexité et de quantité de données qui transitent.

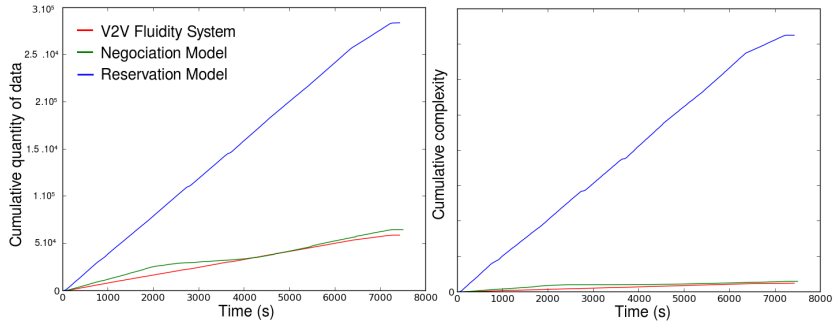

FIGURE 5.10 – Quantité de données cumulées et complexité des modèles

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

5.3.4 Sensibilité : comportement humain

Dans cette section, nous testons la sensibilité de notre modèle par rapport aux comportements humains. Dans notre système le conducteur est capable de contrôler son véhicule, nous devons donc tester l'introduction de comportements humains différents. Un conducteur peut avoir une attitude prudente ou au contraire conduire de manière impulsive. Le modèle de mobilité de Krauss dans SUMO permet d'introduire un comportement stochastique du conducteur grâce à la valeur σ dans les attributs du véhicule, il agit sur la capacité à garder une vitesse stable. Le conducteur fait ainsi varier sa vitesse selon l'algorithme de Mersenne Twister [84] (permet de générer un nombre aléatoire). Lorsque σ est égale à 0, le conducteur agit de manière déterministe (vitesse stable), et plus σ se rapproche de 1 plus la conduite est erratique et le comportement est donc agressif (vitesse instable). Nous testons donc trois profils : 0, 0.5 et 1.

Dans un second temps nous testons différentes accélérations et décélérations, le tableau 5.2 résume les trois profils utilisés : lent, normal, rapide. Ces profils représentent la capacité du conducteur à accélérer et décélérer rapidement ou non.

Vehicle type	Slow	Medium	High
Acc (m/s)	1.39	1.74	2.78
Dec (m/s)	3.48	3.97	4.63

TABLE 5.2 – Profils : accélération/décélération

Notre modèle est résistant aux comportements instables (figure 5.11) avec un maximum de 9.2 secondes en temps de parcours et 2.6 secondes en temps d'attente entre des conducteurs nerveux ($\sigma = 1$) et des conducteurs aux comportements déterministes ($\sigma = 0$). Enfin $\sigma = 0$ et $\sigma = 0.5$ ont des résultats similaires.

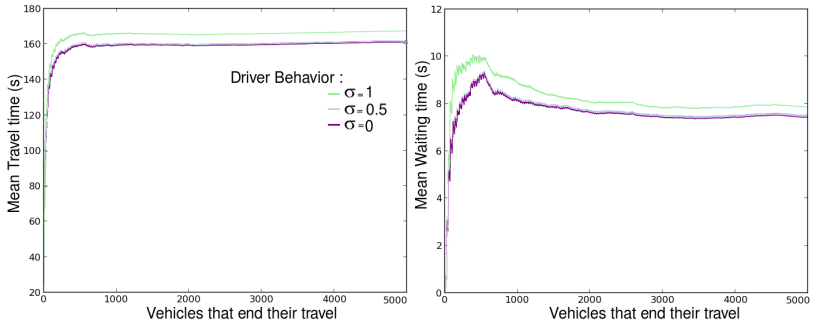

FIGURE 5.11 – Moyenne du temps de parcours et d'attente en fonction des différents comportements humains

Notre modèle est aussi résistant face à des accélérations/décélérations normales et fortes (figure 5.12) avec une différence maximale de 6 secondes en temps de parcours et de 1.55 secondes en temps d'attente entre les deux. Cependant avec des conducteurs lents, une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

différence maximale de 16.22 secondes est observée en temps de parcours et 12.55 secondes en temps d'attente en comparaison des accélérations/décélérations fortes.

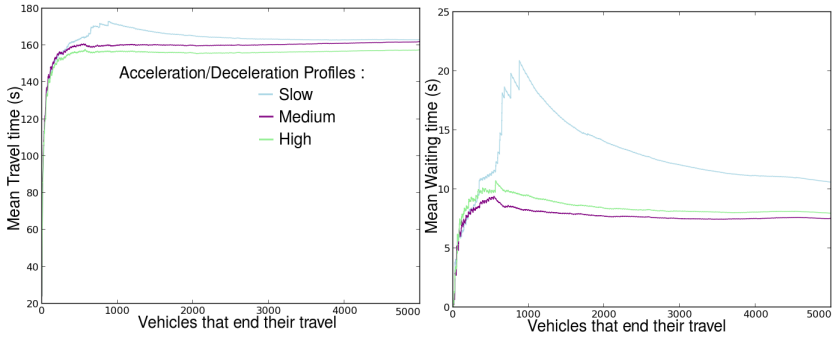

FIGURE 5.12 – Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents profils d'accélération et décélération

5.3.5 Sensibilité : taux d'équipement

Dans cette section nous testons la sensibilité de notre modèle selon le taux d'équipement des véhicules en dispositifs communicants. Nous conservons le comportement nerveux : $\sigma = 0.8$ dans nos simulations (les heures testées sont des heures de pointe). Notre système est local, donc le taux de pénétration a un impact sur la quantité de donnée et sur les performances du système. Ce test peut être assimilé au scénario où un pourcentage de véhicule n'est pas coopératif et ne suit pas la recommandation du système. La figure 5.13 montre les résultats en temps de parcours et en temps d'attente. Nous remarquons qu'à partir d'un taux d'équipement autour de 30%-40% (ou une volonté de suivre le système par les véhicules à hauteur de ce pourcentage) les résultats sont significatifs, puisque nous évitons la congestion dans le rond-point, ainsi les véhicules équipés ont un impact sur les non-équipés.

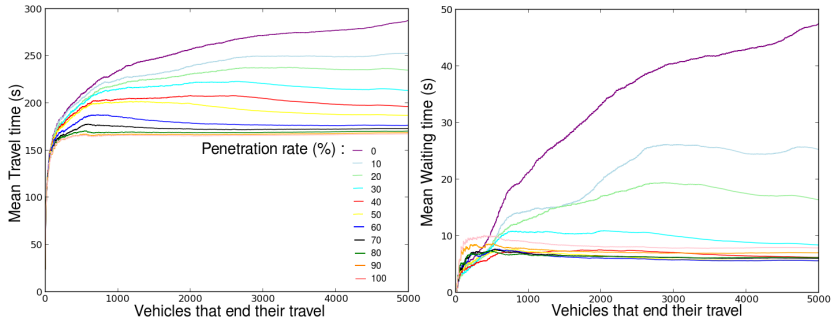

FIGURE 5.13 – Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents taux d'équipement

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

5.3.6 Sensibilité : densité

La capacité géographique du rond-point est capable d'absorber le trafic réel sans le besoin des feux de circulation. Nous testons donc des conditions de fort trafic. Pour cela nous rajoutons un flux supplémentaire de véhicules, respectant la distribution initiale des données réelles. La figure 5.14 montre les moyennes en temps de parcours, et en temps d'attente avec différentes densités véhiculaires. Les résultats avec notre modèle sont stables avec 5000 (données réelles), 6900, 7900 et 8500 voyages. Pour 7900 et 8500 voyages, le rond-point avec les feux de circulation n'est plus en mesure d'évacuer la congestion accumulée dans le rond-point. Le système réel ne supporte pas la densité et explose en temps de parcours et en temps d'attente entre 6900 et 7900 véhicules, il n'est plus efficace dans cette situation. Nous notons que le temps de parcours et le temps d'attente diminuent à la fin de la simulation dans le système réel car la loi d'arrivée devient nulle à la fin de la simulation.

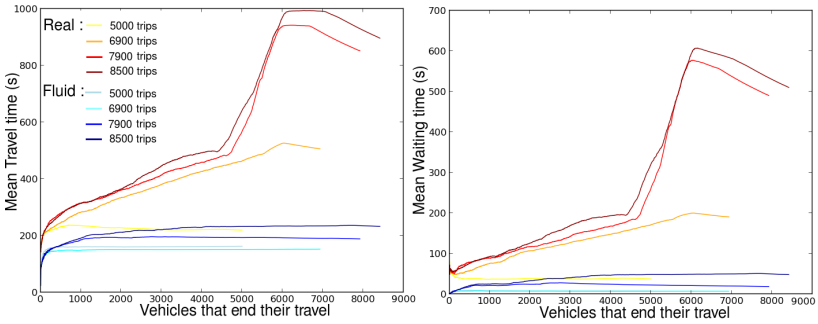

FIGURE 5.14 – Moyenne du temps de parcours et d'attente en fonction des différentes densités

5.3.7 Sensibilité : perte de paquets

Nous évaluons maintenant l'impact de la perte de paquets. La figure 5.15 (A) montre les résultats dans le cas d'un trafic réel (5000 voyages). Nous ne représentons pas la situation avec 100% de perte de paquet, car cela correspond à la situation où aucun véhicule n'est équipé (voir la section 5.3.5). Plus de paquets sont perdus, plus le temps de parcours est élevé avec une différence de 15% (27 secondes) entre une perte de 80% et 0%. Il y a une différence importante entre une perte de 100% (voir la section 5.3.5, avec aucun véhicule équipé) et une perte de 80%. Cela signifie que notre modèle est efficace avec peu d'information. L'impact est minime sur le temps d'attente ($1s$ de différence au maximum entre 0 et 80%).

Nous testons maintenant un trafic dense (8500 voyages). La figure 5.15 (B) montre les résultats, nous ne représentons pas la perte de 80% car les résultats sont trop mauvais. Nous remarquons que lorsque la perte est de 40 ou 20% les résultats sont meilleurs que sans aucune perte de paquet. La relation entre la perte de paquet et le nombre de conflits calculés est représenté dans la figure 5.16. Avec 40% et 20% de perte de paquet, soit certains conflits ne sont pas résolus et ceci évite d'autres conflits, et réduit le temps d'attente et le temps de parcours ; soit beaucoup de paquets ne contiennent pas de conflits à résoudre. Cependant si trop de paquets sont perdus (au delà de 40%), trop d'informations sont perdues et trop de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

conflits sont irrésolus, les performances diminuent considérablement. Nous concluons alors que si la qualité du canal est parfaite, il n'est pas utile de calculer tous les conflits, ou encore si la qualité du canal est moyenne avec une perte de 20 à 40% des paquets, notre modèle améliore les résultats en temps d'attente et de parcours.

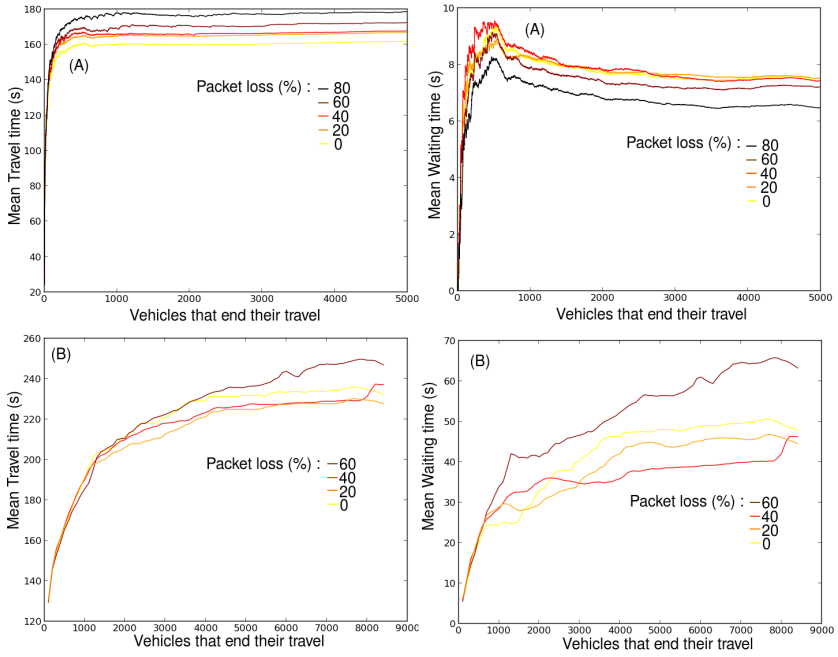

FIGURE 5.15 – Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents taux de perte de paquet avec : (A) un trafic normal, (B) un fort trafic

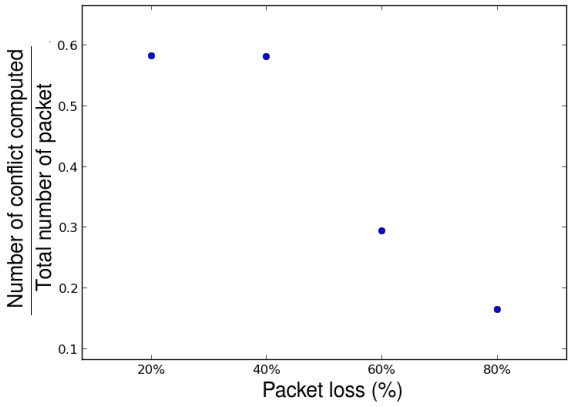

FIGURE 5.16 – Relation entre la perte de paquet et le calcul de conflits

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

5.3.8 Sensibilité : rayon de communication

Pour compléter notre étude, nous évaluons l'impact du rayon de communication. Nous simulons cinq rayons de communication, les véhicules reçoivent l'information et envoient leurs données à 20, 50, 100, 200 et 300 mètres du rond-point, dans chaque direction (Nord, Sud, Est et Ouest). Nous testons également le rayon de communication en fonction de la longueur de la section de route entrant dans le rond-point, ainsi nous choisissons 100 mètres pour le Sud, 90 pour le Nord et 200 mètres pour l'Est et l'Ouest qui possèdent des routes bien plus longues. Nous appelons ces résultats : *Selon la longueur de la route*, dans la figure 5.17. Le rayon n'a pas d'impact sur le temps d'attente sur un trafic normal (figure 5.17 (A)), cependant il en a sur le temps de parcours avec une amélioration de 10s avec un rayon programmé selon la longueur de la route.

Nous effectuons ensuite les mêmes tests sur un trafic lourd (8500 véhicules). La figure 5.17 (B) montre qu'avec des rayons courts (20, 50 et 100 mètres) les véhicules ne sont pas en mesure de réagir lorsqu'ils reçoivent l'information trop près du rond-point, les conflits ne peuvent être résolus à temps. Ensuite, pour des distances supérieures à 100 mètres ou *selon la longueur de la route*, les résultats sont constants et meilleurs. Nous notons que le temps d'attente et de parcours diminuent à la fin de la simulation car la loi d'arrivée des véhicules devient nulle.

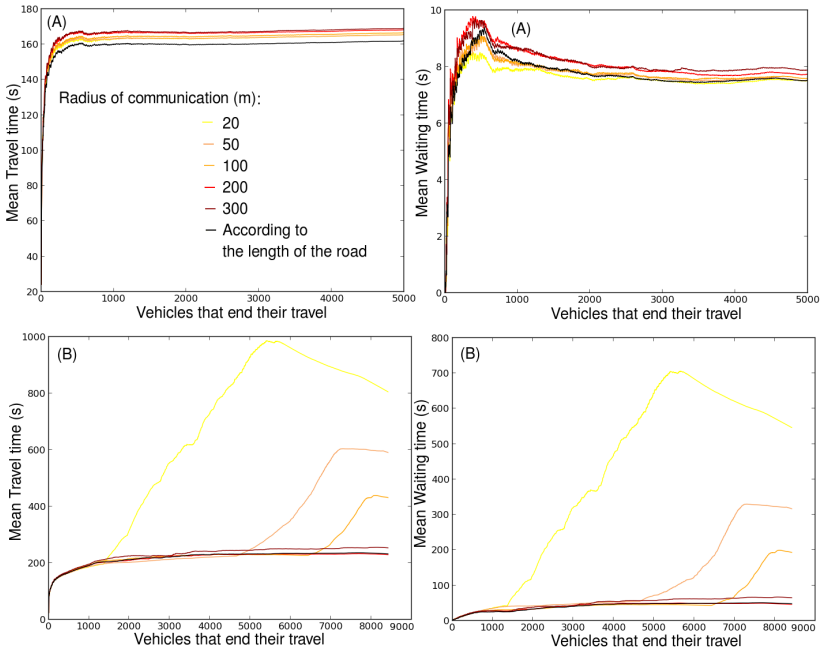

FIGURE 5.17 – Moyennes du temps de parcours et d'attente en fonction des différents rayons de communication avec : (A) un trafic normal, (B) un trafic fort.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

5.4 Conclusion

Ce chapitre présente un système décentralisé de communication entre véhicules (V2V), portant sur un algorithme simple qui élimine les conflits éventuels entre les trajectoires des véhicules arrivant sur le rond-point. Ce système montre le potentiel d'un contrôle du trafic individuel sans infrastructure fixe et de manière décentralisée. Ce modèle permet une insertion beaucoup plus fluide dans le rond-point, tout en respectant la tolérance du conducteur face au temps et à la place disponible pour effectuer cette insertion. Les résultats de cette étude montrent que le modèle est robuste à la densité véhiculaire et aux différents comportements humains. De plus, nous évitons la congestion lorsque plus de 30%-40% des véhicules sont équipés. Le modèle de fluidification apporte un gain en temps correspondant à l'attente pendant un feu rouge, ce qui n'est pas négligeable sur un trajet quotidien. Il réduit également les écarts types du temps de parcours et d'attente et ne crée pas de phénomène de famine (attente infini pour un véhicule). Par ailleurs, la décentralisation permet de réduire la quantité de donnée en transit et la complexité des calculs. De plus, lorsque la densité véhiculaire dépasse un certain seuil, il n'est pas nécessaire de calculer tous les conflits. 60 à 80% des conflits calculés ou, vue sous un autre angle, 20 à 40% de paquets perdus, permettent de bonnes performances. Enfin, le modèle est résistant aux variations du rayon de communication, mais à forte densité il doit être supérieur à environ 100 mètres. Cette valeur est réaliste car notre étude sur le terrain (chapitre 3) a montré qu'avec un bon équipement, le rayon de communication peut aller de 150 mètres à 1 kilomètre. Ce chapitre montre le potentiel d'une communication décentralisée V2V à travers un modèle simple de prise de décision individuelle, à une échelle moyenne représentée par un rond-point complexe.

Cependant, cet algorithme simple nécessite une validation dans différents environnements urbains. Il serait également intéressant d'évaluer son impact sur une agglomération ou une route comprenant plusieurs ronds-points. Mais il faut garder à l'esprit qu'obtenir des données réelles et produire une trace synthétique au niveau d'un rond-point représente un travail de longue haleine (section 3.2 du chapitre 3). Cette étude montre que le rond-point est largement capable d'absorber le trafic réel, quand les feux de circulation sont absents. Nous avons dû augmenter la densité de manière artificielle pour simuler un fort trafic, ce qui peut biaiser les résultats. Il serait intéressant d'évaluer l'algorithme sur une trace équivalente à celle de ce rond-point (sans les feux), mais possédant une congestion réelle importante. Finalement, notre système se base sur le respect des distances de sécurité, or, beaucoup de conducteurs ne les respectent pas et plus particulièrement en ville. Il se base également sur de la géo-localisation mais cette dernière se détériore en cas de fort traffic, des systèmes plus précis devront être utilisés. Un algorithme plus complexe pourrait répondre à ce problème, ou encore un système affichant, à l'approche du rond-point, le gain de temps possible en fonction de la distance de sécurité. Des tests réels seraient alors intéressants pour intégrer correctement le comportement humain dans la simulation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 6

Prise de décision locale à des intersections autonomes : impact sur la ville

Dans ce chapitre nous passons à l'échelle supérieure : un quartier dans une ville. Actuellement la croissance continuelle des activités économiques dans les villes, engendre une demande de la mobilité individuelle qui va considérablement s'accroître dans le futur. Dans ce contexte, la congestion véhiculaire entraîne une perte de productivité et un déclin de la qualité de vie dans ces zones urbaines. Comme nous avons pu le voir, les ITS sont une solution prometteuse pour résoudre ce problème. Des solutions centralisées sont largement étudiées et utilisées pour fluidifier et contrôler le trafic routier dans une ville mais elles requièrent un coût en installation et la quantité de données à traiter est considérable. Les solutions décentralisées considèrent les véhicules comme des agents autonomes mais dans le cadre des ITS au niveau industriel, cela pose le problème de la responsabilité en cas de danger. De plus le passage à l'échelle est difficile avec ce genre de solutions futuristes.

Ici, nous nous intéressons à la fluidification du trafic véhiculaire dans la ville et donc aux calculs des trajets des véhicules avec différents accès à l'information. Ainsi nous proposons deux modèles hybrides entre les approches centralisées et les approches décentralisées. Dans le premier modèle, des intersections choisies stratégiquement sont équipées dans la ville. Elles sont capables de rassembler des informations locales du trafic et de les partager localement avec les véhicules situés autour d'elles. Dans le second modèle, ces mêmes intersections sont liées à une unité centrale de gestion du trafic. Ainsi tous les véhicules du réseau ont accès à l'information locale de chaque intersection et ainsi ils possèdent une connaissance partielle du réseau. Nous allons montrer que nos deux modèles avec de l'information locale ou partielle, possèdent des résultats proches d'une solution centralisée, qui elle donne un accès total à l'information. Pour valider cette affirmation, nous introduisons une application appelée *Smooth Way*, permettant au conducteur de customiser son trajet en choisissant, soit d'améliorer son temps de parcours, soit d'améliorer sa consommation en carburant, soit d'effectuer un compromis entre les deux.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Ce chapitre est organisé de la manière suivante, tout d'abord un état de l'art présente brièvement des solutions centralisées et décentralisées pour améliorer le temps de parcours et/ou la consommation dans le réseau, selon différents accès à l'information. Puis nous formalisons les deux modèles hybrides ainsi que l'application *Smooth Way*. Enfin nous testons les performances des modèles que ce soit du point de vue véhiculaire ou communicatif (réseau).

6.1 État de l'art

La recherche du chemin le plus rapide est une solution largement étudiée pour résoudre le problème de la congestion, les algorithmes les plus utilisés sont Dijkstra [35], A* [58] et Floyd [45]. Deux types de système de collecte d'information existent pour utiliser ces algorithmes : centralisé et décentralisé. Les solutions centralisées avec un accès total à l'information sont largement utilisées. Par exemple, dans l'article [36], les auteurs proposent une version de Dijkstra avec une fonction d'utilité sur chaque lien reflétant les conditions de trafic ainsi que la consommation. Dans l'article [102], les auteurs utilisent une heuristique dans l'algorithme A*. Les auteurs de l'article [29] proposent une unique fonction de coût pour évaluer le temps de parcours et la consommation en même temps. Dans l'article [52], les auteurs utilisent l'agrégation de données afin de prédire la meilleure route pour les véhicules. D'autres recherches tendent à améliorer le chemin jusqu'à destination en comparant les parcours planifiés, avec ceux réellement pris par les conducteurs [54]. Certaines solutions centralisées prennent en compte des données historiques comme dans l'article [77]. Ils utilisent les vitesses collectées grâce aux données des GPS.

Les approches décentralisées permettent aux véhicules d'échanger entre eux, des informations pour améliorer leur trajet en temps de parcours et/ou en consommation de carburant et/ou en émissions en particules [20]. Dans ce contexte décentralisé des informations peuvent manquer, dans l'article [20], les auteurs utilisent des données statiques comme celles de Google Map. Des méthodes inspirées de la biologie (nous en ferons un état de l'art dans le chapitre 7 suivant) comme les algorithmes inspirés par le comportement des fourmis sont largement utilisées pour trouver une solution optimale à la fluidification du trafic [24]. Ces derniers sont très adaptables et parfaits pour les études sur les graphes.

Qu'ils soient décentralisés ou centralisés, ces algorithmes doivent collecter une grande quantité de données sur le réseau en entier, pour être optimaux. Certaines recherches n'essaient pas d'être optimales mais essaient de tendre vers cet optimum. Dans l'article [106], les auteurs utilisent une connaissance partielle du réseau, collectée par les utilisateurs dans un système centralisé. À l'instar de l'application Waze, un serveur reçoit les tweets vocaux des conducteurs sur des événements du trafic. Le serveur forme ensuite des clusters de ces tweets, selon leur lieu géographique et le moment de leur diffusion. Il poste ensuite les événements et de nouvelles routes sont calculées grâce à l'algorithme A*. Les véhicules partagent leurs expériences et appartiennent à des communautés selon leur position et leur destination. Dans l'article [19], les auteurs utilisent les préférences de l'utilisateur ainsi que des facteurs tels que le nombre de virage, le nombre de feux ou la largeur des routes. D'après ces métriques, leur algorithme trouve la route satisfaisant les préférences des conducteurs. Pour cela, ils combinent un algorithme

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

génétique avec celui de Dijkstra. Dans l'article [27], les auteurs quantifient l'impact d'un accès partiel à l'information dans le calcul de la route optimale, leur étude se concentre sur le taux de participation des utilisateurs et de la disponibilité des unités de bord de route communicantes.

6.2 Prérequis

6.2.1 Modélisation du réseau

Un réseau véhiculaire peut être représenté par un graphe $G(I, E)$, où $\{I_1...I_n\}$ est l'ensemble fini des intersections et $E = \{l_1, ...l_m\}$ est l'ensemble fini des sections de routes. Une section de route est délimitée par deux intersections $l_{jk} = (I_j, I_k)$. G est orienté : $(I_j, I_k) \neq (I_k, I_j)$. Le trajet d'un véhicule, c, est un chemin orienté, composé de plusieurs sections de route $R^c = \{l_{ij}, ..., l_{rs}\}$, où la $i$ème section de route se termine où la $i + 1$ commence. Nous formaliserons notre problème grâce à ces notations.

Le problème est donc de trouver le meilleur chemin pour tous les véhicules pour améliorer la fluidité globale du trafic ainsi que la consommation en carburant totale du réseau. Ceci en prenant en compte le choix de l'utilisateur dans l'application mise à sa disposition appelée *Smooth Way*. En effet, dans cette dernière, le conducteur peut choisir d'améliorer sa consommation, son temps de parcours ou faire un compromis entre les deux durant son trajet. Nous notons ces paramètres $P = \{T, C, TC\}$, T pour le Temps de parcours, C pour la Consommation et TC pour les deux. La solution optimale de ce problème requière une connaissance totale à chaque pas de temps du réseau en entier, ce qui implique un équipement lourd [64], une quantité de données à traiter considérable et une capacité de calcul importante [132]. Nous proposons d'optimiser la fluidité et la consommation globale dans une zone urbaine selon les contraintes suivantes :

- Pas de détérioration majeure du choix individuel P du conducteur.
- Un accès partiel ou/et local à la connaissance du trafic sur le réseau

Définition 1 : Fonction de coût.
G est un graphe pondéré, nous définissons le poids selon la valeur P :

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{N} & \rightarrow & [0, \infty[\\ t & \mapsto & w_{l_{ij}}^P(t) \end{array} \tag{6.1}$$

$w_{l_{ij}}^P(t)$ est la moyenne de la valeur P sur la section de route l_{ij} au temps t.

Définition 2 : Taux d'occupation.
Soit N le nombre de véhicules sur la section de route l_{ij} de longueur $L_{l_{ij}}$. Le taux d'occupation (RO) correspond au nombre de véhicule par unité de longueur, en pourcentage :

$$RO = \frac{4.N}{L_{l_{ij}}}.100 \tag{6.2}$$

Cette formule du taux d'occupation implique une longueur relativement uniforme des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

véhicules (4 mètres). Cette hypothèse est dérivée de la valeur moyenne observée sur des traces réelles. Les régions urbaines analysées sont principalement constituées de véhicules légers, peu de poids lourds circulent dans les centres urbains, ils empruntent plutôt les contournements. Le taux d'occupation, comme étant le nombre de véhicules sur une section de route, est une information facile à obtenir. Elle nous permet de connaître si un état de congestion est observé, de manière plus précise que si nous avions seulement la vitesse sur la section de route concernée (par exemple un véhicule seul à faible vitesse peut mener à une évaluation fausse des conditions du trafic). Par la suite, si ce taux d'occupation dépasse (voir la section 6.3) un certain seuil, nous considérons qu'un bouchon est en train de se former.

6.2.2 L'application *Smooth Way*

Nous proposons une application où le conducteur peut choisir d'améliorer sa consommation en carburant, son temps de parcours, ou faire un compromis entre les deux :

$$w_l^{TC}(t) = r w_l^T(t) + (1-r) w_l^C(t) \tag{6.3}$$

avec $0 \leq r \leq 1$ permettant ce compromis ($P = TC$). Si $r = 1$, l'utilisateur souhaite améliorer seulement son temps de parcours, nous appellerons ce cas *Quick Way*. Si $r = 0$, l'utilisateur souhaite améliorer seulement sa consommation, nous appellerons ce cas *Green Way*. *Smooth Way* permet un compromis entre le fait d'arriver vite à destination tout en consommant le moins possible.

Quick Way.

Si $r = 1$, P est donc le temps de parcours : T. Nous notons $w_l^T(t)$ la moyenne en temps de parcours de la section de route l au temps t par :

$$w_l^T(t) = \frac{M_l(t)}{L_l} + \beta(Blocked) \tag{6.4}$$

avec $M_l(t)$ la vitesse moyenne sur la section de route l au temps t, et L_l sa longueur. Ainsi $\frac{M_l(t)}{L_l}$ représente le temps de parcours de la section de route l au temps t.

$$\beta(Blocked) = \begin{array}{l} \infty \text{ si problème} \\ 0 \text{ sinon} \end{array} \tag{6.5}$$

Cette fonction permet aux véhicules sortant d'une intersection de signaler si la route sur laquelle ils se trouvent est bloquée à cause de travaux, d'un véhicule stoppé ou tout autre événement imprévu.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Green Way.

Si $r = 0$, P est égale à la consommation en carburant : C. La fonction de coût est alors définie par :

$$w_l^C(t) = C_{average_l}(t) \tag{6.6}$$

$C_{average_l}(t)$ est la moyenne en consommation de carburant sur la section de route l selon le nombre de véhicule, noté : $\|Z_l(t)\|$.

$$\begin{array}{ll} C_{average_l}(t) = \frac{\sum_{c_i \in Z_l(t)} C_{c_i}(t)}{\|Z_l(t)\|} & if \quad \|Z_l(t)\| \neq 0 \\ C_{average_l}(t) = C_{min_l} & else \end{array} \tag{6.7}$$

avec $C_{c_i}(t)$ la consommation au temps t pour le véhicule c_i, et C_{min_l} la consommation d'un véhicule circulant seul sur la section de route l à la vitesse maximale autorisée.

Finalement pour l'application *Smooth Way*, nous définissons le compromis entre le temps de parcours et la consommation du trajet $\{l_{1_c}, ..., l_{k_c}\}$ du véhicule c par :

$$\begin{array}{ll} TC_c & = \sum_{i=1}^{k_c} w_l^{TC}(t_i) \\ & = r \sum_{i=1}^{k_c} w_l^T(t_i) + (1-r) \sum_{i=1}^{k_c} w_l^C(t_i) \end{array} \tag{6.8}$$

Nous notons t_i quand le véhicule c arrive près de l'intersection I_i le long de son trajet $R^c = \{l_{1_c}, ..., l_{k_c}\}$.

6.3 Modèles décentralisés avec information locale ou partielle du réseau

Nous proposons deux modèles hybrides pour disséminer l'information, à mi-chemin entre les approches décentralisées et centralisées. Nous souhaitons étudier la corrélation entre l'accès à l'information et les décisions prises visant à optimiser le trafic. Dans nos modèles, certaines intersections $I' \subseteq I$ sont équipées avec un dispositif de communication. Elles sont capables de rassembler et disséminer de l'information portant sur leur environnement.

Dans le premier modèle, appelé PDLAIS *Partial, Decentralized and Locally Autonomous Information Strategy*, les intersections équipées ne peuvent pas communiquer avec une unité centrale, elles sont indépendantes. Seule leur connaissance locale du trafic est échangée parmi les véhicules se trouvant dans une zone limitée par le rayon de communication de l'intersection.

Dans le second modèle, appelé PCCIS *Partial, Centralized and Coordinated Information Strategy*, les intersections équipées communiquent leurs informations à une unité centrale, ainsi elles partagent une connaissance partielle du réseau avec tous les véhicules. Par conséquent, tous les véhicules du réseau ont accès à l'information locale agglomérée par ces intersections.

Pour évaluer le potentiel d'un accès local (PDLAIS) ou partiel (PCCIS) à l'information

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

du réseau, nous comparons nos deux modèles avec GCIS *Global and Centralized Information Strategy*, une solution centralisée où chaque véhicule connaît l'état du trafic du réseau entier à chaque pas de temps.

Dans nos deux modèles hybrides, les intersections équipées assurent une communication à un saut. Soient $J \in I'$ une intersection équipée et $l_{out}(J)$ ses liens sortants, grâce à la communication V2I, l'intersection J connaît à chaque pas de temps le nombre de véhicule sur ses liens sortants. En effet, chaque véhicule positionnée sur un lien sortant envoie des messages réguliers contenant son identité id, l'identité du lien où il se trouve $laneId$, sa consommation, sa vitesse, ainsi que la valeur $\beta(Blocked)$ (voir la section 6.2.2) en cas de problème anormal détecté sur la voie de sortie de l'intersection. Ainsi l'intersection J, avec ces informations, est capable d'évaluer le taux d'occupation RO, la consommation moyenne $C_{average_l}(t)$ et le temps de parcours $\frac{M_l(t)}{L_l}$, de ses liens l sortants : $l \in l_{out}(J)$. Elle est donc capable de calculer la fonction de coût : $w_l^P(t)$. Elle envoie ensuite ces informations aux véhicules approchant de l'intersection. Ainsi chaque véhicule arrivant, reçoit la fonction de coût $w_l^P(t)$ des liens sortants. Cependant si le taux d'occupation ou la consommation moyenne dépasse un certain seuil sur un de ses liens sortants $l \in l_{out}(J)$, l'intersection J envoie la valeur ∞ au lieu de la fonction de coût réel :

$$\exists l \in l_{out}(J) \begin{cases} C_{average_l}(t) \geq \xi_l^C \\ RO(t) \geq \xi_l^T \end{cases} \tag{6.9}$$

ξ_l^T est un taux fixé selon la vitesse autorisée et la largeur de la route en question, les valeurs se trouvent dans un livre portant sur l'étude du trafic routier [83]. Les valeurs de seuils que nous utiliserons pour le taux d'occupation sont présentées dans le tableau 6.1 des paramètres de simulation dans la section 6.4.1. Quant au seuil de consommation, ξ_l^C, il est fixé selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \xi_l^C &= 1.5 * C_{min_l} \\ \xi_l^T &= \text{Seuil du taux d'occupation} \end{aligned} \tag{6.10}$$

La valeur C_{min_l} correspond à une consommation de carburant d'un véhicule voyageant seul sur la section de route l au temps t et à la vitesse maximale autorisée. La consommation de carburant peut se diviser en deux parties : 1) une consommation ne dépendant pas de la vitesse est de 2 litres par heure, 2) la consommation dépend des frottements aérodynamques de la voiture dans l'air et elle est donc proportionnelle au carré de la vitesse de la voiture. Ensuite nous considérons que les véhicules ont une consommation autour de 10 litres au 100 kilomètres à 150 km/h, avec ces hypothèses nous pouvons établir l'équation suivante pour évaluer cette consommation [83] :

$$C = \frac{2L_l}{V} + \frac{13V^2}{33750} \tag{6.11}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

L_l est la longueur de la section de route l. Ainsi avec $V = V_{max}$, nous avons une estimation de la consommation C_{min_l} sur la section de route l. Tous les véhicules possèdent le même profil de consommation, dans le futur nous pourrions considérer une consommation spécifique pour chaque véhicule, cependant ces données sont difficiles à obtenir. En effet, dans les traces véhiculaires disponibles, le type de véhicule est rarement spécifié en détails.

Pour résumer, à chaque pas de temps, les intersections équipées envoie la fonction de coût : $w_l^P(t)$ de chacun de ses liens sortants $l \in l_{out}(J)$. Dans PDLAIS, les intersections envoient ses valeurs aux véhicules approchant, dans PCCIS, elles envoient leurs informations au centre de contrôle du trafic. Lorsque le taux d'occupation ou la consommation moyenne dépasse le seuil, l'intersection envoie donc la valeur ∞ au lieu du coût réel. Ces seuils permettent à l'intersection de gérer son flux de trafic, en effet les véhicules approchant reçoivent ces informations sur les liens sortants et recalculent leur chemin avec l'application *Smooth Way*.

Au début de son voyage, un véhicule c calcule son plus court chemin R^c avec l'algorithme de Dijkstra. Les poids utilisés dans l'algorithme, représentent la fonction de coût $w_l^P(t)$, selon P choisi par le conducteur au début du trajet (voir la section 6.2.2). Cependant à $t = 0$, le véhicule ne possède aucune information sur le réseau, ainsi les temps de parcours et les consommations avec une vitesse maximale sont utilisés. Dans PDLAIS, quand un véhicule rencontre une intersection équipée, il recalcule son plus court chemin avec la nouvelle fonction de coût de chaque lien sortant, envoyée par l'intersection. Donc le nombre d'itinéraire calculé est borné par le nombre d'intersection rencontrée durant son voyage. Dans PCCIS, le centre de contrôle du trafic envoie les informations locales de chaque intersection à tous les véhicules. Ainsi, tous les véhicules recalculent leur chemin à chaque pas de temps sur la base d'une information partielle du réseau. Les véhicules du premier modèle ont donc une information locale du réseau, les véhicules du second modèle ont une information partielle du réseau, la quantité d'information circulant alors dans le réseau est bien plus faible que dans une solution centralisée. Ceci évite les problèmes de saturation.

Nous remarquons donc que le nombre et le choix des intersections dans le réseau jouent un rôle important dans nos modèles. Logiquement les intersections possédant des problèmes récurrents de congestion devraient être choisies. En effet, s'il n'y a pas de congestion et que le trafic est fluide, le taux d'occupation ou la consommation en carburant n'excéderont jamais le seuil, la valeur ∞ ne sera jamais envoyée aux véhicules et ces derniers ne changeront sûrement pas d'itinéraires. Nous voulons donc trouver la quantité minimale d'intersections à équiper afin de tendre vers des performances en fluidité du trafic et en consommation de carburant proche d'une solution centralisée, tout en sachant que chaque véhicule utilise l'application *Smooth Way*.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

6.4 Simulations et résultats

6.4.1 Environnement et hypothèse

Nous utilisons SUMO [32], Simulator of Urban MObility version 0.22 couplé à TraCI (Traffic Control Interface) [122], l'interface permettant de contrôler le comportement des véhicules de manière individuelle durant la simulation et d'extraire toutes sortes d'information en temps réel. Nous utilisons la trace de Cologne du projet TAPASCologne [113]. Une hypothèse forte est que tous les véhicules sont équipés d'un dispositif de communication 802.11*p*. Le tableau 6.1 décrit les paramètres des simulations.

Dimension de la carte	1400m x 666m
Durée	7 am to 7 : 15 am.
Nombre de véhicules	1800
Nombre d'intersections équipées	64
Vitesse sur les routes rapides	90, 80 and 70 km/h
Seuil de congestion sur route rapide	$RO > 16\%$
Vitesse sur les routes lentes	50 and 35 km/h
Seuil de congestion sur route lente	$RO > 20\%$

TABLE 6.1 – Paramètres des simulations

Afin de trouver le nombre d'intersections à équiper, de tester la valeur r du compromis de *Smooth Way* et de tester nos deux modèles hybrides, nous considérons quatre configurations différentes des itinéraires sur la carte de Cologne. La première configuration est issue du projet TAPASCologne, les quatre autres considèrent de nouveaux itinéraires avec un départ et une arrivée choisis de manière aléatoire. Mais nous considérons le même nombre de véhicule ainsi que la même distance parcourue par chacun afin de rester proche d'une configuration réelle. Nous les appelons : *Map1Cologne* (données réelles), *Map2, Map3, Map4, Map5*.

Dans la zone urbaine sélectionnée dans Cologne, différents types de routes sont présents, nous les catégorisons comme lentes ou rapides. Leurs limites en taux d'occupation sont présentés dans le tableau 6.1 et ces limites représentent donc le seuil ξ_l^T définies dans la section 6.3.

En ville, les voyages sont quotidiens et se répètent chaque jours, ainsi certaines intersections sont plus congestionnées que d'autre durant la journée. Dans notre proposition, nous équipons toutes les intersections ne possédant pas de feux de circulation. Le trafic est déjà régulé à ces endroits par un système existant, nous ne prétendons pas le supprimer mais plutôt nous adapter à la configuration urbaine actuelle. Afin de limiter le nombre d'intersection à équiper au départ, durant une observation de la zone urbaine sans système ITS, nous comptons combien de fois, les liens extérieurs des intersections sans feux, excèdent le seuil ξ_l^T en taux d'occupation. Nous sélectionnons dans un premier temps, toutes les intersections ayant au moins un lien extérieur possédant un seuil plus grand que 0. Ce qui représentent en moyenne 64 intersections sur les 5 configurations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans les simulations suivantes, nous comparons les deux modèles : PDLAIS et PCCIS avec la solution centralisée GCIS. Nous allons déterminer le nombre minimal d'intersections à équiper. Nous testerons différentes valeurs de r de l'application *Smooth Way* afin de déterminer s'il vaut mieux conduire vite ou économiser du carburant. Nous testerons également la stabilité de cette valeur r en introduisant différents comportements de conducteur. Enfin nous testerons la sensibilité par rapport à la perte de paquet.

6.4.2 Nombre d'intersections à équiper.

Nous souhaitons connaître le nombre d'intersections à équiper afin d'être efficace en temps de parcours, en consommation et en temps d'attente globaux dans le modèle PDLAIS en appliquant *Smooth Way* dans chaque véhicule. Nous décidons donc de progressivement diminuer le nombre d'intersections équipées au départ en fonction de leur problème de congestion. Les résultats sur le temps de parcours, la consommation et le temps d'attente sont présentés dans la figure 6.1. La valeur 1 sur l'axe des abscisses représente la valeur de référence en cas de simulation sans aucun équipement ITS (sans connaissance du réseau). La surface en bleue représente la solution optimale avec toute la connaissance du réseau (solution centralisée GCIS). Nous notons que seulement un faible nombre d'intersections parmi les plus congestionnées ont besoin d'être équipées : autour de 2%, sur le total de toutes les intersections de la carte, soit environ 3 à 6 intersections sur les 64 selon la configuration des itinéraires (*Map1, Map2, Map3, Map4, Map5*). Nous obtenons alors des résultats proches de 5 à 7% de la solution centralisée. De plus, si 20 à 30% des intersections sont équipées, cela introduit du bruit et nous obtenons des résultats plus mauvais que dans la situation sans le système ITS (les points de congestions sont déplacés à des endroits plus problématiques dans la ville).

6.4.3 Valeur de r dans *Smooth Way*.

Sur les mêmes graphes de la figure 6.1, pour chaque différent taux d'équipement des intersections, nous testons différentes valeur de r. Nous pourrons ainsi tester s'il vaut mieux gagner du temps, diminuer la consommation en carburant ou effectuer un compromis entre les deux dans le réseau. Nous considérons que tous les véhicules choisissent le même r. Les valeurs $r = 0.1$ et $r = 0.5$ donnent les meilleurs résultats avec un gain de 10% en temps de parcours et 25% en temps d'attente avec 2% des intersections équipées. Elles obtiennent de meilleurs résultats en consommation, temps de parcours et temps d'attente que pour $r = 1$ (*Quick Way*). Elles sont également meilleures que $r = 0$ (*Green Way*). $r = 0.1$ et $r = 0.5$ permettent un compromis entre la consommation en carburant et le temps de parcours tout en permettant un gain de 25% en temps d'attente sur la zone urbaine considérée.

Cependant la valeur $r = 0.1$ surpassent la valeur $r = 0.5$, en effet la variance pour 0.5 est plus grande (voir le tableau 6.2) ce qui signifie que certains utilisateurs vont être pénalisés et perdre trop de temps pour la communauté.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

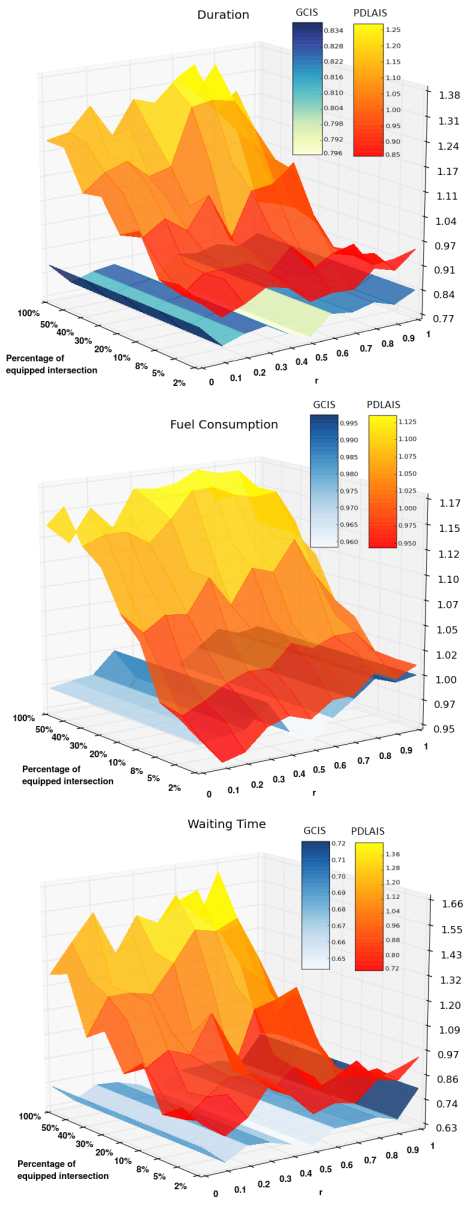

FIGURE 6.1 – Gain en temps de parcours, en consommation de carburant et en temps d'attente selon $r \in [0, 1]$ dans *Smooth Way* et le taux d'équipement des intersections.

6.4.4 PDLAIS versus PCCIS.

Nous utilisons donc $r = 0.1$ avec 2% des intersections équipées afin de comparer les performances des deux modèles hybrides. Le but de cette section est de voir si finalement un centre de trafic est nécessaire. Comme le montre la figure 6.2, le modèle avec de l'information locale (PDLAIS) et le modèle avec une information partielle (PCCIS) ont des résultats similaires avec le même écart type pour chaque paramètre étudié. PCCIS est meilleur de seulement 2% en consommation et également de 2% en écart type. Mais cette différence est négligeable.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

σ^2	Pourcentage d'intersection équipée								
	100%	50%	40%	30%	20%	10%	8%	5%	2%
Temps de parcours									
r=0.5	0.25	0.21	0.23	0.13	0.18	0.17	0.15	0.18	0.18
r=0.1	0.25	0.20	0.17	0.14	0.13	0.08	0.08	0.07	0.10
Consommation									
r=0.5	0.04	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02
r=0.1	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01
Temps d'attente									
r=0.5	0.59	0.38	0.58	0.30	0.34	0.25	0.20	0.25	0.29
r=0.1	0.51	0.47	0.37	0.26	0.18	0.11	0.12	0.15	0.14

TABLE 6.2 – Ecart type en consommation et en temps de parcours et d'attente pour $r = 0.1$ et $r = 0.5$

En termes de données qui circulent, PCCIS et PDLAIS surpassent la solution centralisée GCIS, selon la figure 6.2 seul 4.04% de la totalité des données est utilisé dans les modèles hybrides. Ensuite PDLAIS surpasse PCCIS en termes de quantité de données reçues dans le véhicule. En effet, dans PCCIS, tous les véhicules reçoivent des données du centre de contrôle du trafic alors que dans PDLAIS seul 6.7% des véhicules reçoivent ces données. Ainsi PDLAIS permet une économie énorme de la quantité de données, évitant ainsi la saturation et permettant un traitement en temps réel de l'information. Un centre de contrôle du trafic n'est donc pas nécessaire. Dans PCCIS, beaucoup de véhicules reçoivent, finalement, des informations qu'ils n'utilisent pas car ils ne passent pas par les intersections équipées. Pour le reste des simulations, nous nous concentrons sur le modèle PDLAIS.

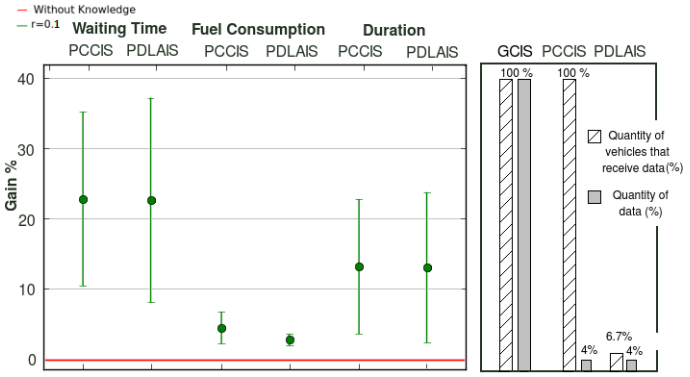

FIGURE 6.2 – Comparaison de PDLAIS et PCCIS

6.4.5 Stabilité de la valeur r dans PDLAIS.

Nous testons ici la stabilité de la valeur $r = 0.1$ en introduisant différents comportements des utilisateurs dans l'application *Smooth Way*, c'est-à-dire différente valeur de r. Nous testons la distribution initiale où tout le monde choisi 0.1, puis une distribution normale de moyenne 0.1, ainsi qu'une valeur aléatoire de r. Les cercles sur la figure 6.3 montrent les résultats en temps de parcours, en temps d'attente et en consommation de carburant selon les trois distributions dans

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

les différentes configurations d'itinéraires (axe X). Nous notons que les performances peuvent varier considérablement selon la configuration des itinéraires mais cette variation est un gain positif. Globalement la consommation, le temps d'attente et de parcours sont stables pour les trois distributions, avec une variation de 2 à 3% pour la consommation, 5% pour le temps de parcours et 10% pour le temps d'attente. Les résultats avec la distribution normale (de moyenne 0.1) montre que même en introduisant d'autres comportements d'utilisateurs au sein de *Smooth Way*, le modèle reste stable. Des résultats similaires sont obtenus avec une distribution équiprobable (la moyenne est alors $r = 0.5$ qui était aussi une bonne solution dans notre modèle).

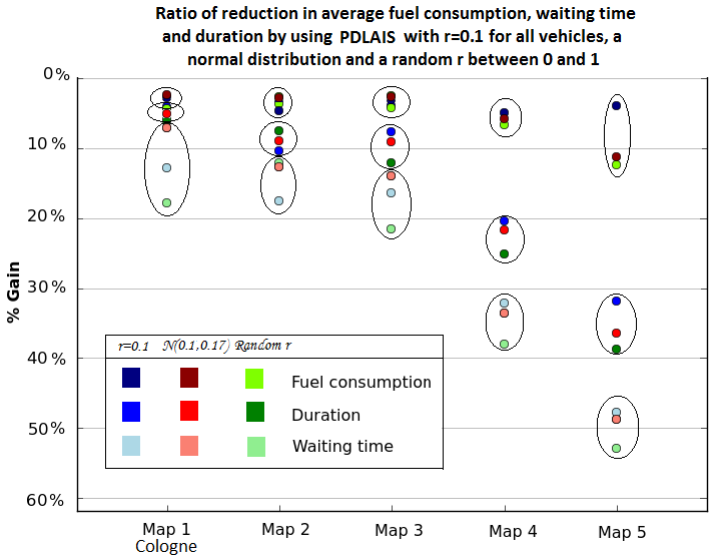

FIGURE 6.3 – Différentes distributions de r avec PDLAIS

6.4.6 Perte de paquet sur PDLAIS.

Pour compléter notre étude, nous évaluons l'impact de la perte de paquet sur le modèle PDLAIS. Nos simulations ne prennent pas en compte les buildings ou les autres obstacles pouvant freiner les performances du système, ainsi les tests suivants donnent une idée de l'impact de la perte de paquet sur PDLAIS. Nous comparons deux situations, dans la première les véhicules ont une probabilité $P(d)$ de perdre les paquets reçus selon l'équation 6.12, dans la seconde les véhicules reçoivent les messages avec une probabilité $P(d) = 1$. Dans les deux situations les véhicules reçoivent les messages à une distance de d mètres de l'intersection. Nous utilisons la loi de Nakagami [70] afin d'évaluer la perte de paquet en fonction de la position du véhicule par rapport à l'intersection d (nous considérons que les intersections ont une capacité de communication sur un rayon $D = 250$ mètres).

$$P(d) = 1 - e^{-3.(\frac{d}{D})^2}.(1 + 3.(\frac{d}{D})^2 + 4.5.(\frac{d}{D})^4) \tag{6.12}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Nous évaluons cette perte sur les cinq configurations d'itinéraires. La figure 8.1 montre les résultats. Pour de larges distances, supérieures à 200 mètres, les résultats sont stables : le besoin de l'information est local et immédiat, avoir les données plus tôt n'est pas significatif, nous observons même un gain de 3% en cas de perte de paquet. Enfin recevoir l'information proche de l'intersection, en dessous de 200 mètres avec de la perte de paquet produit des résultats 3 à 4% plus mauvais que sans perte de paquet (pour le temps d'attente et de parcours). Pour la consommation la différence est négligeable. Notre modèle est donc résistant à la perte de paquet.

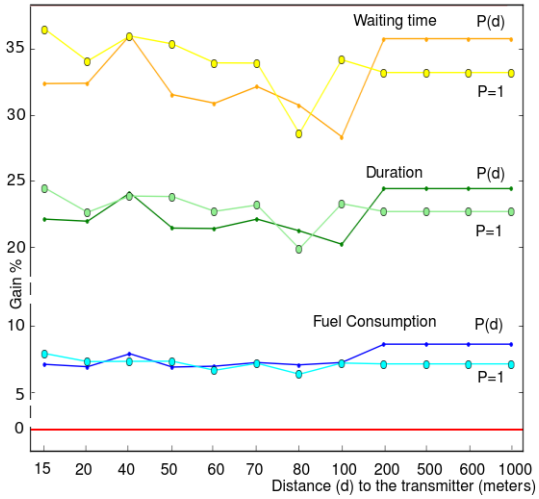

FIGURE 6.4 – Impact de la perte de paquet selon la distance du véhicule par rapport à l'intersection

6.5 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre mettent en évidence qu'une zone urbaine a besoin d'être équipée seulement à des endroits stratégiques, à savoir les intersections les plus congestionnées. Des prises de décisions locales à ces points clés, permettent de diminuer le temps de parcours, le temps d'attente et la consommation en carburant de manière globale. Ainsi, notre modèle donne des résultats différents de 5% à 7% de ceux d'une solution centralisée, où les véhicules possèdent les informations du réseau à tout moment. La quantité de donnée qui transite dans la zone urbaine avec notre modèle est considérablement réduite, car seuls les véhicules passant par les intersections connectées utilisent de l'information. Cette dernière est d'ailleurs très locale et ne nécessite donc pas d'une connexion à un centre de contrôle du trafic. L'application *Smooth Way* utilisée par les véhicules, permet un compromis entre le temps de parcours et la consommation en carburant durant le trajet, grâce à la valeur r. Lorsque r est proche de zéro, le conducteur souhaite améliorer sa consommation, lorsque r est proche de un, il souhaite améliorer son temps de parcours. Ce service a démontré qu'avec la valeur $r = 0.1$ (amélioration de la consommation), le temps de trajet des véhicules est également amélioré. Pour conclure,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

notre solution de communication V2I comprenant de l'information partielle et des prises de décisions locales, exprime son potentiel dans le déploiement d'un service de fluidification.

Il est important de noter que les positions géographiques des congestions dans une ville peuvent varier au cours d'une journée. Nous pourrions donc imaginer, un système où les intersections cesseraient de communiquer en fonction de leur trafic. Nous avons testé le modèle où les intersections sont reliées à un centre de contrôle du trafic, nous pourrions également tester la configuration où ces intersections sont inter-connectées. Si ces dernières se trouvent géographiquement proches, le trafic pourra être redirigé en fonction du taux de congestion du voisinage. Ceci évite un effet indésirable pouvant être causé par notre système, à savoir le déplacement d'une congestion à un autre endroit dans la ville. Enfin, nous pourrions mettre en place une extension de ce modèle à destination des véhicules d'urgence. Les intersections pourraient anticiper le passage futur d'un véhicule prioritaire en évacuant au maximum les véhicules positionnés à ces intersections problématiques en un minimum de temps. Il serait intéressant de reproduire ces tests dans plusieurs quartiers de manière simultanée, afin d'obtenir des résultats sur des trajets plus longs.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 7

Prise de décision avec de l'information partielle en V2V : impact sur la ville

Comme nous l'avons précédemment vu, la fluidité du trafic véhiculaire est un enjeu majeur. Dans le réseau urbain, les temps de parcours des sections de route varient constamment au cours d'une journée et des événements non prévisibles, comme des bouchons fantômes ou des accidents, peuvent le perturber. La première préoccupation est donc d'éviter ces zones de congestion, nous parlons du SPP (Shortest Path Problem). Les solutions statiques du SPP ne prennent en compte, ni les informations trafic en temps réel, ni les parcours de l'ensemble des véhicules (ce qui peut les amener tous au même endroit à un instant t). Nous identifions ainsi deux problèmes : l'accès à une information en temps réel et la coopération entre les acteurs du réseau. Des modèles centralisés répondent à cette problématique. Ils possèdent une connaissance de la totalité du réseau mais cela implique de traiter une quantité importante de données, rendant une réponse en temps réel difficile. Les systèmes décentralisés sont également beaucoup étudiés, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. Parmi ceux-ci, nous nous intéressons aux solutions bio-inspirées. Le modèle le plus utilisé a été introduit par Marco Dorigo et Gianni Di [37] et s'inspire du comportement naturel des fourmis. Elles utilisent des phéromones pour guider la colonie vers une source de nourriture. Les fourmis parcourent différents chemins et échangent leurs informations avec leurs semblables. Les insectes procèdent à ce qu'on appelle du crowdsourcing : c'est l'utilisation de la créativité, de l'intelligence et du savoir-faire d'un grand nombre d'individus pour réaliser certaines tâches. L'algorithme des fourmis appelé ACO (Ant Colony Optimization) a été utilisé dans différents domaines, comme la coloration des graphes ou encore le problème du voyageur de commerce [38]. Dans le SPP, ACO s'utilise en amont du parcours, à l'instar de l'algorithme de Dijkstra et de A*.

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle véhiculaire de crowdsourcing où le véhicule est assimilé à une fourmi cherchant son chemin en temps réel. Au cours de leurs déplacements, les véhicules échangent leur connaissance du réseau avec les autres véhicules. Ils calculent donc

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

leur trajet avec une information partielle du réseau. De plus, ces données, assimilées à des phéromones, possèdent un délai et un degré de fiabilité. Contrairement au chapitre précédent utilisant la communication V2I, nous nous intéressons ici, à la communication V2V. Elle nous permet de créer un réseau de grande envergure en connectant les véhicules entre eux.

Ce chapitre est structuré de la manière suivante, un état de l'art des solutions bio-inspirées pour le SSP, est présenté dans la section suivante. Nous introduisons ensuite les prérequis nécessaires pour nos différents algorithmes de crowdsourcing véhiculaire. Nous évaluons ensuite la dynamique de nos systèmes face à des événements ponctuels tels que des accidents, un acte terroriste ou encore un tremblement de terre.

7.1 État de l'art

Parmi les techniques bio-inspirées, l'article [80] utilise un algorithme génétique pour trouver le plus court chemin en temps, dans divers scénarios comprenant de la circulation réelle. D'autres modèles utilisent la coopération entre les véhicules. Bauza et al. [9] proposent CoTEC (Cooperative Traffic Congestion Detection), une technique de coopération basée sur la communication V2V afin de détecter les zones de congestion. Claes et al. [23] proposent un mécanisme proactif de guidage distribué à travers l'infrastructure routière. Parmi les approches bio-inspirées, beaucoup utilisent le comportement des fourmis [53]. Elles collectent des données en temps réel sur l'environnent et les incorporent dans un algorithme composé d'une heuristique et d'une fonction basée sur les phéromones. Dans l'article [24], Claes et al. proposent un modèle optimisé de l'algorithme ACO, en y combinant la prédiction du temps de parcours. Leur but est de trouver les chemins permettant de réduire le temps de trajet total. Dans ACO, les fourmis sont guidées par les traces de phéromone laissées par leurs congénères ; afin d'éviter la dispersion des insectes, Claes et al. introduisent une première fourmi qui trouve le chemin optimal grâce à A*. Ensuite, la part d'aléatoire dans leur algorithme permet aux autres fourmis de trouver les chemins alternatifs. Wang et al. [121] incluent la densité du trafic dans la fonction de phéromone. Leur algorithme résout ainsi le plus court chemin avec des informations trafic en temps réel. Huang et al [62] introduisent la distance des intersections adjacentes et la saturation du trafic dans le processus des fourmis. Salehinejad et al [103] utilisent un système qui rassemble des données en ligne et hors ligne. Les données du trafic en ligne sont disponibles grâce à un centre de contrôle du trafic. Mais lorsque ce dernier n'est pas disponible, ils utilisent des données historiques et statistiques. Ces données sont alors incorporées dans l'algorithme des fourmis. Claes et al. [25] présentent et évaluent une méthode de coopération entre les fourmis pour améliorer l'algorithme. Quand les fourmis déposent les phéromones pour évaluer la qualité de la route, elles déposent également des phéromones qui décrivent les différentes régions d'où provient le chemin. Cet algorithme demande moins d'itération et donne de bons résultats. Les mêmes auteurs, Claes et al. [26], présentent un système multi-agent, où les fourmis explorent leur environnement et détectent les congestions. D'autres articles s'inspirent de ces insectes, comme [71] où le véhicule utilise le chemin le moins congestionné à chaque intersection, jusqu'à

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

sa destination. Enfin, lorsque l'infrastructure n'est plus disponible (problème d'énergie), Peinado et al. [97] décrivent un modèle utile dans ces situations d'urgence. Les véhicules utilisent le réseau VANET, des puces passives RFID et leur positions GPS afin de trouver le meilleur chemin à chaque intersection selon les informations laissées par les prédécesseurs.

7.2 Prérequis

Dans cette section nous présentons les définitions nécessaires dans la description de nos modèles véhiculaires de crowdsourcing.

Définition : Graphe global G
Un réseau routier peut être représenté par un graphe orienté : $G = (V, E)$, où $V = \{v_1, v_2, ..., v_n\}$ est l'ensemble des noeuds, c'est-à-dire les intersections du réseau et $E = (e_{ij})_{ij}$ représente l'ensemble des liens du graphe, à savoir les sections de route du réseau routier. Le lien e_{ij} relie v_i à v_j et $e_{ij} \neq e_{ji}$. Nous notons $Vmax(e_{ij})$, la vitesse maximale autorisée sur le lien e_{ij}

Définition : Parcours d'un véhicule (P^m)
Nous considérons un véhicule m comme une fourmi dans le réseau. Il possède un départ et une arrivée : O^m et D^m respectivement. Le véhicule utilise le chemin P^m pour joindre O^m à D^m : $P^m = \{R_1, ..., R_n\}$ avec $R_i = e_{jl} \in E$, $R_1 = O^m$ et $R_n = D^m$.

La longueur d'un chemin correspond à sa distance euclidienne notée : $L(P^m)$. Le temps de parcours avec la vitesse maximale autorisée sur chaque section de route est notée : $TT(P^m)$. Un chemin pourra être également appelé parcours et inversement.

Définition : carte des phéromones
Le graphe G est pondéré et chaque véhicule connaît une partie de G au temps présent t. Nous notons $G^m(t)$ le graphe connu par le véhicule m au temps t. C'est un sous-graphe de G : $E^m \subset E$. Les poids sur les liens de l'ensemble E^m représentent l'information en phéromone connue par le véhicule m au temps t. Nous notons $w_{ij}^m(t_0)$, le temps de parcours sur le lien e_{ij} enregistré au temps t_0 par le véhicule m.
Le taux de phéromone sur le lien e_{ij} est alors noté :

$$\tau_{ij}^m = \frac{w_{ij}}{w_{ij}^m(t_0)}$$

w_{ij} est le temps de parcours du lien e_{ij} avec la vitesse maximale autorisée. Le couple de données (τ_{ij}^m, t_0) est associé à chaque lien e_{ij}. τ_{ij}^m est le taux de phéromone sur le lien e_{ij}, il représente la qualité du lien en termes de temps de parcours et t_0 correspond au moment où le véhicule m enregistre la valeur. Ce temps représente la validité de la phéromone. Plus le taux de phéromone est proche de 1, plus le temps de parcours est faible sur le lien, et plus il est proche de 0, plus le lien est congestionné. Enfin, plus $(t - t_0)$ est élevé, plus l'information est ancienne.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Au début, tous les liens ont un taux de phéromone initiale fixé à $\tau_0 = 0.5$. Cette valeur va permettre l'équilibre entre le cas où le véhicule ne possède pas d'information sur le lien et le cas où le lien n'est pas vraiment congestionné, ni vraiment fluide.

Le véhicule m est capable d'échanger ses informations avec les autres véhicules, comme une fourmi. Quand le véhicule traverse un lien, il enregistre le temps de parcours sur son graphe $G^m(t)$ en termes de phéromone, ensuite il échange ce dernier avec les autres véhicules qu'il croise. Le véhicule complète donc son savoir grâce à la connaissance des autres véhicules.

Définition : transports et échanges
Nous considérons un véhicule m croisant un véhicule l au temps t. $G^m(t)$ est le graphe de connaissance du véhicule m et $G^l(t)$ est le graphe du véhicule l. La communication V2V leur permet d'échanger leurs données. Le véhicule m garde les informations les plus récentes et les met à jour (les règles sont symétriques pour le véhicule l).

$$\forall e_{ij} \in E^m \cap E^l : \quad (\tau_{ij}^m, t_0) \leftarrow (\tau_{ij}^l, t_0') \quad \text{ si } t_0 < t_0'$$

Si $e_{ij} \in E^l / E^m$, cela signifie que le véhicule m ne possède pas l'information sur le lien e_{ij}, donc il l'enregistre (τ_{ij}^l, t_0') pour le lien e_{ij}.

Définition : Évaporation de la phéromone
Quand le temps passe, la fiabilité de l'information diminue, nous définissons ce procédé par l'évaporation. Soit t le temps présent, t_0 le temps où le véhicule a enregistré la phéromone sur le lien e_{ij}, $(t - t_0)$ représente alors le temps écoulé depuis l'enregistrement des informations sur e_{ij}. Plus cette valeur est élevée plus l'information est ancienne et devient alors inutile pour le véhicule m. L'évaporation est définie à chaque pas de temps par :

$$\begin{cases} (\tau_{ij}, t_0) \leftarrow (\varphi.\tau_{ij}, t_0) \\ (\tau_{ij}, t_0) \leftarrow (0.5, -1) \quad \text{ si } (t - t_0) \geq T \end{cases}$$

avec

$$\varphi = \frac{t_0}{t}$$

φ représente le gradient de l'évaporation. T est la durée de vie du temps de parcours mesuré. Quand $(t - t_0) \geq T$, le véhicule initialise le lien à 0.5, cela signifie que la valeur enregistrée était trop ancienne. Dans tous les cas, notre modèle pénalise les informations des liens congestionnés, qu'elles soient anciennes ou récentes, grâce à τ. Ensuite, le modèle pénalise les informations anciennes grâce à φ.

Dans ce contexte, le problème pour le véhicule m est de trouver son chemin grâce à toutes ces informations agglomérées le long de son parcours. Nous présentons le concept du modèle de crowdsourcing véhiculaire (figure 7.1) dans la section qui suit.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

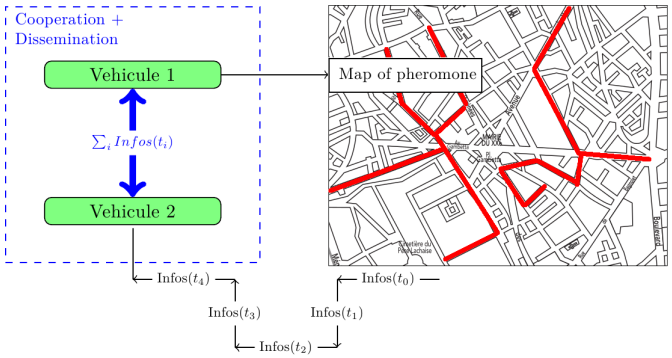

FIGURE 7.1 – Concept du modèle de crowdsourcing véhiculaire

7.3 Modèle de crowdsourcing véhiculaire

L'algorithme des fourmis est inspiré par leur comportement pour trouver des sources de nourriture dans un environnement inconnu. À chaque itération de l'algorithme, chaque fourmi voyage d'un noeud v_i à un noeud v_j, selon une probabilité. Cette probabilité de choisir le chemin est définie pas la qualité du lien déterminée par la quantité de phéromone déposée. Contrairement à la fourmi, le véhicule ne cherche pas un lieu, il connaît sa destination. Dans notre modèle, il est guidé par sa carte de phéromone à chaque pas de temps. La qualité d'un lien est définie également par le taux de phéromone qui indique sa fluidité. La fiabilité de l'information est représentée par l'évaporation.

Dans la section qui suit nous présentons trois modèles de crowdsourcing véhiculaire pour trouver son chemin à l'instar d'une fourmi. Dans les deux premiers modèles, le véhicule utilise toutes les informations rassemblées sur la carte pour trouver son chemin, jusqu'à sa destination. Dans le dernier modèle, le véhicule utilise seulement les valeurs des phéromones localisées autour de lui.

7.3.1 Phéromone sur k-Parcours : *PKP*

Si un véhicule choisit son parcours lien par lien, sans considérer sa destination, comme une fourmi, l'exploration va être longue voire infructueuse. Le véhicule connaît son arrivée, c'est pourquoi nous introduisons un algorithme de k plus courts chemins. Ces chemins vont donner la direction vers la destination et ainsi éviter des explorations inutiles trop loin de l'arrivée du véhicule. Nous utilisons l'algorithme de Yen [82]. Il emploie n'importe quel algorithme connu afin de trouver le plus court chemin, ensuite il trouve le second plus court et ainsi de suite, jusqu'à k chemins. Ici nous utiliserons l'algorithme de Dijkstra. Notre premier modèle fonctionne de la manière suivante, pour un véhicule m au temps t :

- Calcul de k parcours entre la position du véhicule et sa destination D^m, avec les coûts sur les liens égaux à w_{ij} (temps de parcours sur le lien e_{ij} avec la vitesse maximale).
- Calcul de la probabilité de choisir le parcours, $P_n = \{R_1, ..., R_n\}$ parmi les k chemins :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

$$p(P_n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\gamma.\tau_i}{n.L(P_n)}}{\sum_n \sum_i \frac{\gamma.\tau_i}{n.L(P_n)}}$$

avec

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau_i \text{ est connu} \\ \beta & \text{si } \tau_i \text{ est inconnu} \end{cases}$$

$\beta < 1$ permet donc de donner moins d'importance au valeur de phéromone inconnue par le véhicule (c'est-à-dire égale à 0.5). Le véhicule va choisir le chemin ayant la plus haute probabilité parmi les k plus courts chemins. Ensuite, si deux parcours possèdent la même probabilité, l'algorithme choisit le chemin ayant la plus faible variance en phéromone. Nous considérons qu'un véhicule va préférer prendre deux sections de route ayant une fluidité moyenne plutôt qu'une section libre suivie d'une section complètement congestionnée.

7.3.2 K-Phéromone Parcours : *KPP*

Dans cette seconde méthode, l'algorithme calcule k plus courts parcours directement sur la carte de phéromone. Les poids considérés dans l'algorithme, sur les liens e_{ij}, sont les suivants :

$$\frac{w_{ij}}{\gamma.\tau_{ij}}$$

avec

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau_i \text{ est connu} \\ \beta & \text{si } \tau_i \text{ est inconnu} \end{cases}$$

$\beta < 1$ permet donc de donner moins d'importance au valeur de phéromone inconnue par le véhicule (c'est-à-dire égale à 0.5). Ensuite la probabilité pour choisir le chemin P_n est donnée par :

$$p(P_n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\tau_i}{n.L(P_n)}}{\sum_n \sum_{i=1}^{n} \frac{\tau_i}{n.L(P_n)}}$$

Comme dans la méthode précédente *PKP*, si deux chemins possèdent la même probabilité, l'algorithme choisit le chemin ayant la variance la plus faible en phéromone.

7.3.3 Exploration des Parcours de Phéromone : *PPE*

La troisième méthode est proche du comportement des fourmis. Dans le modèle ACO, la probabilité de bouger sur un lien e_{ij} pour une fourmi dépend de deux valeurs, tout d'abord l'attractivité du lien qui est calculée par une heuristique, ensuite la trace de phéromone laissée par les autres fourmis indiquant l'efficacité des mouvements passés. Dans les algorithmes, le taux de phéromone peut être mis à jour une fois la fourmi arrivée à destination, ou à chaque pas de temps. Ainsi le taux de phéromone augmente ou diminue indiquant les bonnes ou les mauvaises décisions respectivement.

Dans cette méthode, le véhicule agit comme une fourmi, en explorant son environnement proche. L'algorithme *PPE* calcule tous les chemins possibles dans toutes les directions autour

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

du véhicule, selon la condition suivante : $TT(P) < T$. Nous rappelons que T est la durée de vie de la phéromone enregistrée et $TT(P)$ est le temps de parcours du chemin P avec la vitesse maximale autorisée. Nous obtenons alors un ensemble de chemin : $\{P_l\}_l$. La probabilité de choisir un de ces chemins $P_l = \{R_i, ..., R_s\}$ est donnée par :

$$\frac{\sum_{j=i}^{s} \xi.\tau_j^{\alpha}.(1-\xi).\eta_{is}}{\sum_{P_k}(p(P_k))}$$

avec

$$\eta_{is} = \frac{L(R_i \rightarrow D^m)}{L(P_l) + L(R_s \rightarrow D^m)}$$

R_i est la position actuelle du véhicule m. R_s est la fin du chemin P_l. $L(R_s \rightarrow D^m)$ correspond à la distance euclidienne du plus court chemin entre R_s et la destination du véhicule m : D^m. Et $L(P_l)$ correspond à la distance euclidienne du chemin P_l.

Si la valeur de la phéromone est connue par le véhicule alors $\alpha = 1.5$, sinon $\alpha = 1$, nous donnons ainsi plus d'importance aux valeurs connues par le véhicule. ξ permet de donner plus ou moins d'importance à la valeur de la phéromone ou la longueur du chemin.

7.4 Simulations et résultats

7.4.1 Environnement

Nous utilisons le simulateur SUMO (version 0.22) ainsi que l'interface de contrôle TraCI afin de contrôler les véhicules en temps réel [32]. Nous devons tester différentes valeurs de T, β et ξ. Nous rappelons que T correspond à la durée de validité de la phéromone. Lorsque T est écoulé, la phéromone devient égale à la valeur de référence 0.5 (l'information est trop ancienne). Dans le calcul de la probabilité du chemin pour les modèles PKP et KPP, β permet de donner de l'importance aux phéromones connues par le véhicule. Dans le modèle PPE, ξ permet de donner de l'importance au taux de phéromone ou à la longueur du chemin. Nous appelons β, ξ, T, les *paramètres des phéromones*.

Dans nos simulations, la longueur des chemins est entre 300 mètres et 800 mètres environ, au delà de $k = 4$ chemins calculés les voyages deviennent trop longs et inutiles. Dans des simulations plus grandes, ce paramètre pourra être testé.

Pour évaluer différentes valeurs des *paramètres des phéromones*, nous utilisons une carte de Manhattan de taille 4×4. Comme nous l'avons déjà vu dans les chapitres précédents, cette carte est beaucoup utilisée comme cas d'école [64], [104]. 200 véhicules voyagent sur la grille avec des départs et des arrivées aléatoires. La vitesse limite est de 50 km/h (vitesse limite des zones urbaines françaises). Nous simulons trois itérations de cette configuration. Le rayon de communication utilisé est de 60 mètres pour toutes les simulations à venir. Les véhicules relaient l'information de proche en proche (V2V), une grande distance de communication n'est donc pas nécessaire. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le trafic est congestionné.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

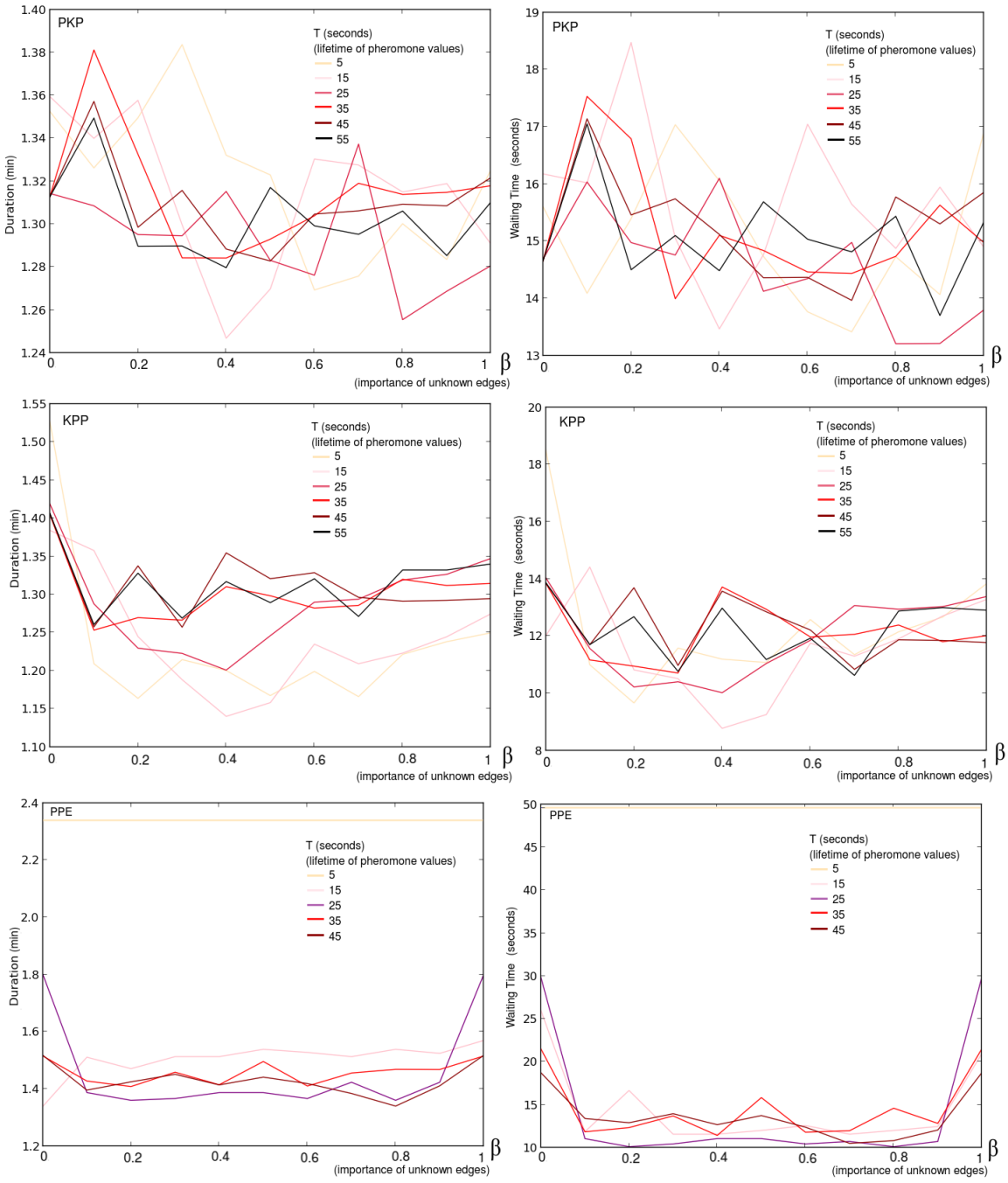

FIGURE 7.2 – Calibration des *paramètres des phéromones*

Les résultats de la calibration des *paramètres des phéromones* sont présentés dans la figure 7.2. $T = 15$ secondes et $\beta = 0.4$ apparaissent comme les meilleures valeurs pour PKP et KPP. Ensuite, $T = 25$ secondes et $\xi = 0.2$ apparaissent comme les meilleures valeurs pour PPE. Il apparaît que T doit être court, montrant que l'information importante pour choisir le chemin

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

se trouve autour du véhicule. Ceci souligne également que le trafic évolue rapidement, par conséquent la mise à jour des données doit être dynamique. Pour les modèles *PKP* et *KPP*, la valeur $\beta = 0.4$ permet de considérer le manque d'information avec un pourcentage mesuré. Les liens avec une phéromone connue sont d'avantage pris en compte mais la possibilité de choisir des sections de route inconnues en cas de forte congestion, n'est pas exclue. Enfin pour *PPE*, α permet déjà de donner de l'importance au lien dont les phéromones sont connues, ainsi $\xi = 0.2$ évite les chemins trop longs. Nous notons que les valeurs de phéromone non connues impliquent du hasard dans le calcul du chemin rendant les résultats instables. Le tableau 7.1 résume les paramètres utilisés pour les simulations suivantes.

Paramètres/Modèle	*PKP*	*KPP*	*PPE*
Durée limite de l'information T (s)	15	15	25
Importance des phéromones non connues β	0.4	0.4	$\emptyset$
Importance des phéromones ξ	$\emptyset$	$\emptyset$	0.2

TABLE 7.1 – Paramètres des phéromones

7.4.2 Impact de nos modèles

7.4.2.1 Carte de Manhattan

Nous testons *PKP, KPP* et *PPE* sur la carte de Manhattan, dans les mêmes conditions que la section précédente. Nous les comparons aux modèles suivants :

- Aucune information n'est présente dans le réseau, le scénario est appelé *WOK* pour *WithOut Knowledge*.
- Chaque véhicule possède un GPS ou un système de navigation, le scénario est appelé *TKD* pour *Traffic Knowledge thanks to a Device*.
- Nous comparons également nos modèles avec l'algorithme des fourmis présenté dans l'article [24]. Les auteurs incluent les temps de parcours dans le modèle classique des fourmis. Nous l'appelons *ACO*, pour *Ant Colony Optimization*.

Les résultats sont présentés dans le tableau 7.2. Nos trois modèles surpassent les autres en temps de parcours et en temps d'attente. De plus les écarts types montrent que les modèles sont équitables. Ce scénario présenté sur une grille n'est pas représentatif car irréaliste au niveau du trafic véhiculaire (les départs et les arrivées des véhicules sont définis de manière aléatoire) et au niveau de la topologie du terrain. Ce test donne seulement une idée des performances des modèles. Nous les comparons donc, sur la ville de Cologne dans la section suivante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

	WOK	*PKP*	*KPP*	*PPE*	TKD	ACO
Duration (min)	2.33	1.08	1.00	1.22	2.17	1.38
Duration SD(min)	8.99	4.16	3.24	4.29	7.16	5.9
Duration Max (s)	281.33	164.0	129.0	195.0	100.22	196.0
Speed (km/h)	14.53	20.56	22.52	21.51	18.85	17.64
Waiting Time (s)	49.61	9.73	4.79	9.31	29.07	19.34
Waiting Time SD	50.45	15.93	8.26	14.4	30.24	24.07
Waiting Time Max (s)	165.66	69.0	46.0	69.0	24.12	91.6
Route Length (km)	0.449	0.329	0.353	0.405	0.641	0.327
Route Length SD (km)	4.12	3.58	8.46	5.34	8.51	1.12

TABLE 7.2 – Résultats sur la carte de Manhattan

7.4.2.2 Carte réelle

Nous testons maintenant les trois modèles sur une carte réelle. Pour un scénario réaliste, nous utilisons les données du projet TAPASCologne [113], reproduisant le trafic urbain dans la ville de Cologne. Nous nous focalisons dans un quartier de dimension 1200 mètres par 800 mètres, sur la durée de $6h00$ à $6h15$, ce qui représente 1200 véhicules (figure 7.3).

FIGURE 7.3 – Quartier de Cologne utilisé pour la simulation

Nous comparons ici nos modèles avec celui présenté dans le chapitre précédent [76], où les intersections les plus congestionnées sont équipées dans la ville. Il permet aux véhicules de se rediriger grâce aux informations de ces intersections intelligentes. Nous rappelons le nom de ce modèle : $PDLAIS$ pour *Partial, Decentralized and Locally Autonomous Information Strategy*. Nous les comparons aux cas extrêmes, à savoir le modèle sans système ITS (WOK) et le modèle centralisé (CS). Dans ce dernier les véhicules possèdent l'information trafic du réseau en entier, à chaque pas de temps. Les résultats sont présentés dans le tableau 7.3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Real Map	WOK	PKP	KPP	PPE	CS	PDLAIS
Duration (min)	1.64	1.58	1.51	1.61	1.45	1.58
Duration SD (min)	8.02	7.56	7.02	8.8	6.19	7.58
Duration Max (min)	8.31	9.11	7	10.3	6.36	9.23
Speed (km/h)	34.74	34.76	35.33	36.17	36.14	35.20
Waiting Time (s)	22.14	19.86	17.50	15	15.21	19.46
Waiting Time SD (s)	37.66	33.14	29.66	24.6	23.73	34.53
Waiting Time Max (s)	327.0	332.0	290	294.0	181	387
Route Length (km)	0.839	0.819	0.809	0.786	0.818	0.837
Route Length SD (km)	12,36	11,76	11,58	12.39	11.83	11.84

TABLE 7.3 – Resultats sur la carte de Cologne

Les trois modèles de crowdsourcing véhiculaire *PKP*, *KPP* et *PPE* présentent de bons résultats et améliorent le temps de parcours et le temps d'attente par rapport à une situation sans information (*WOK*). De plus leurs résultats sont proches de la solution centralisée. Dans le cas d'une circulation normale, nos modèles sont équivalent à *PDLAIS* présenté dans le chapitre précédent. Notons que le modèle *KPP* est le meilleur en temps de parcours et *PPE* est le meilleur en temps d'attente.

7.4.3 Investigation de l'impact d'incidents urbains

Un incident se réfère à n'importe quoi qui pourrait stopper ou ralentir le flux du trafic. Dans le réseau urbain, cela peut-être un accident de voiture ou des mauvaises conditions météorologiques par exemple. Il y a peu d'option pour simuler ce genre d'événement dans SUMO cependant des outils existent pour simuler des conditions similaires. Nous testons les modèles de crowdsourcing véhiculaire dans trois situations : un accident de voiture, un acte terroriste et une catastrophe naturelle. Dans chaque section qui suit, nous décrivons chaque scénario utilisé afin de tester la robustesse et le dynamisme de nos modèles face à l'environnement. Nous utilisons les mêmes conditions de simulation que le scénario précédent sur la ville de Cologne.

7.4.3.1 Accident

Pour simuler un accident de voiture, il suffit d'arrêter une ou des voitures pendant une durée limitée durant leurs parcours [108]. D'autres outils existent, comme allonger le feu rouge ou limiter la vitesse sur une route. Nous décidons d'utiliser la première option. Nous stoppons donc plusieurs véhicules sur une route à trois voies possédant un flux véhiculaire important, sur la carte de Cologne (voir la figure 7.4).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

FIGURE 7.4 – Localisation de l'accident sur le quartier de Cologne

Simulations et résultats.

Nous calculons le temps de parcours et le temps d'attente des véhicules qui ne se trouvent pas bloqués dans l'accident. Nous relevons également le nombre de véhicules arrivant à destination selon le modèle simulé, ce paramètre permet d'évaluer l'efficacité du modèle. En effet des véhicules vont être bloqués par l'accident, et étant donné que la route bloquée possède une forte affluence, des routes annexes peuvent aussi être encombrées. Ainsi plus le nombre de véhicules capable de contourner la zone est grand, plus le modèle est efficace. Et parmi ces derniers, si leur temps de voyage et leur temps d'attente est faible alors le modèle est performant.

Real Map	WOK	KPP	PKP	PPE	CS	PDLAIS
Percentage of vehicles that end their travel	76	89	78	85	98	78
Duration (min)	1.30	1.65	1.27	1.54	1.79	1.30
Duration SD (min)	5.06	11.11	4.93	7.34	9.92	4.92
Waiting Time (s)	11.26	23.47	11.05	15	25.59	11.43
Waiting Time SD (s)	19.07	58.77	18.57	22.53	47.50	18.92

TABLE 7.4 – Résultats sur la carte de Cologne en cas d'accident

Les modèles permettant au plus grand nombre de véhicule d'éviter la zone de l'accident et les embouteillages causés par ces derniers, sont *KPP* et *PPE*, avec plus de 85% des véhicules arrivant à leur destination (les autres restent bloqués par l'accident). Cependant la moyenne et l'écart type du temps d'attente et de parcours sont plus mauvais pour *KPP* que *PPE*, ce qui signifie que les contournements trouvés par *KPP* sont plus longs que ceux trouver par *PPE*. Les modèles *PKP* et *PDLAIS* ont des résultats proches de la situation sans système (*WOK*). Il est important de noter que leurs moyennes sont plus faibles que les autres car le nombre de véhicules arrivés est plus faible. *PDLAIS* mise sur la position de certaines intersections communicantes dans la ville, si ces dernières ne sont pas proches de l'accident, le modèle ne peut être performant au niveau de cette zone. *PKP*, lui, calcule les k chemins sans information sur le trafic en temps réel au départ, ceci peut créer un handicap pour les véhicules passant dans cette zone. En augmentant la valeur de k, nous pourrions peut-être améliorer la performance de ce modèle sur une carte plus grande mais la complexité de l'algorithme de Yen et son temps de calcul augmentera également.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

7.4.3.2 Terrorisme

Il existe plusieurs études concernant la modélisation du transport dans des situations extrêmes comme celle du 11 septembre 2001. Plusieurs explorent les stratégies d'évacuations en prenant compte de la distribution de la population et du comportement des véhicules au sein de tel scénario [96]. Dans l'article [3], les auteurs proposent un système capable de rassembler des informations de sources et de localisations diverses afin de les propager dans le réseau, grâce à la communication V2V et le cloud. Pour montrer l'efficacité de leur modèle, ils ont modélisé une explosion de matières dangereuses dans une usine de verre. Les auteurs de l'article [123], analysent les impacts de la position des abris mis en place, à la suite d'une évacuation due à une attaque nucléaire sur Washington DC. Dans [75], les auteurs étudient la demande en transport et ses performances dans le cas d'attaques de bombes radiologiques (*dirty bombs*). Ils étudient comment une détonation peut dégrader le système des transports, surtout en période de pointe. Ils montrent ainsi que les artères principales des quartiers concernés atteignent leur capacité maximale.

Nous utilisons les observations et les analyses de l'article [75] afin de simuler une attaque terroriste dans un quartier de la ville de Cologne. Nous testons ainsi la capacité de nos modèles à propager l'information et évacuer les véhicules de la zone dangereuse.

Les données utilisées dans l'article [75], proviennent d'un état de l'art composé d'une banque de données sur le comportement de la population, dans le cas hypothétique d'une attaque sur Washington DC. Leur article étudie 1 à 2 millions de voyages, cette quantité de données est trop important pour nos simulations. Nous utiliserons donc leurs résultats et observations sur les processus d'évacuation pour reproduire sur une carte plus petite le même scénario. Ainsi durant une attaque, le nombre de voyage est doublé : la population dans les bâtiments où dans leur maison évacue la zone avec leur voiture. De plus, le pourcentage de véhicule quittant complètement la région est de 13% des voyages totaux. Nous appliquons ces observations sur la zone signalée en rouge dans la figure 7.5, c'est la partie la plus empruntée par les véhicules en temps normal.

FIGURE 7.5 – Localisation de l'acte terroriste.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Simulations et résultats.

Real Map	WOK	PKP	KPP	PPE	CS	PDLAIS
Duration (min)	1.82	1.77	1.60	1.50	1.49	1.64
Duration SD (min)	10.21	9.33	8.09	12.73	6.69	8.35
Duration Max (min)	10.11	9.43	12.22	15.88	6.5	9.43
Speed (km/h)	33.63	33.39	34.71	34.24	35.96	34.84
Waiting Time (s)	28.98	24.24	20.14	23.12	16.4	20.73
Waiting Time SD (s)	51.96	38.43	38.12	47.12	27.14	37.9
Waiting Time Max (s)	439	371	531	471	268	417
Route Length (km)	0.857	0.862	0.825	0.776	0.823	0.853
Route Length SD(km)	12.56	13.51	11.99	19.18	12.3	12.18

TABLE 7.5 – Résultats sur la carte de Cologne en cas d'acte terroriste

Le modèle *PPE* utilise des informations locales en phéromone autour du véhicule. Il obtient les meilleurs résultats en temps d'attente malgré des écarts types plus grands, ce qui signifie que certains véhicules sont lésés par rapport aux autres. *KPP* et *PDLAIS* ont de bons résultats avec les meilleurs écarts types. Ils sont les plus proches de la solution centralisée. Cependant *PDLAIS* est dépendant de l'infrastructure, si celle-ci se trouve être positionnée dans la zone dangereuse, ces résultats ne peuvent être assurés. Les modèles de crowdsourcing véhiculaire, eux ne dépendent pas de l'infrastructure et peuvent être performants quelque soit le lieu de l'explosion.

7.4.3.3 Catastrophe naturelle

Une catastrophe naturelle peut être un tsunami, une éruption volcanique ou un tremblement de terre par exemple. Les questions d'évacuation et les facteurs qui les influencent sont très étudiées, particulièrement en science sociale et plus récemment par les ingénieurs. La modélisation de l'évacuation est très complexe car elle dépend d'un large éventail de paramètres, d'observations et d'hypothèses. Des études sur le terrain à large échelle aident considérablement à comprendre la complexité de ces phénomènes et à valider les processus de modélisation. Les auteurs de l'article [95] présentent une étude sur la modélisation d'une évacuation en cas de catastrophe. Dans l'article [126], les auteurs utilisent les données du trafic collectées durant les désastres causés par Hurricanes, Ivan et Katrina, afin d'analyser en détails les mouvements des personnes. Durant un tremblement de terre, la localisation des cassures sur les routes ne peut être prédite à l'avance, cependant les auteurs de l'article [125] proposent un modèle probabiliste sur ces cassures, selon l'intensité du tremblement de terre. Nous utiliserons ce modèle pour simuler un état de catastrophe sur la zone urbaine de Cologne. La probabilité qu'une section de route r du réseau soit passable est défini par :

$$p_r = e^{-\lambda . l_r}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

p_r est la probabilité que la route r soit praticable par un véhicule après le tremblement de terre. λ est la constante représentant le taux de cassure de la section de route, selon l'intensité du tremblement de terre (locations/km) et l_r est la longueur (km) de la section de route r. La valeur de λ est obtenue à partir du rapport d'un bureau au Japon gérant les catastrophes [127]. Une intensité de 4 sur l'échelle de l'agence météorologique et sismique du japon (JMA) ne cause pas de cassure, une intensité de 5 JMA peut causer entre 0.035 et 0.11 cassures par kilomètre, 6 JMA en cause autour de 0.16 et enfin 7 JMA en cause 0.48.

Simulations et resultats.

Dans le scénario que nous proposons, les véhicules vont agir comme les fourmis, et propager l'information des liens disponibles ou inutilisables après la catastrophe. Grâce à ces informations un véhicule d'urgence essaiera de se frayer un chemin à travers la ville. Une intensité de 7 JMA (intensité maximale sur l'échelle) est une situation trop catastrophique pour être exploitée. Nous utilisons une valeur de 0.11 qui correspond à une intensité de 5. Nous appliquons ainsi la probabilité de cassure ci-dessus, sur le quartier de la ville de Cologne utilisé précédemment. Dans ce genre de situation, l'important est de pouvoir faire circuler un véhicule d'urgence. Nous évaluons donc l'impact en temps de parcours de ce véhicule traversant la zone urbaine sinistrée. Dans nos modèles, ce dernier obtient assez d'information, il sera amener à faire des détours pour arriver à destination. Mais il se peut qu'il n'obtienne pas assez d'information et reste coincé au milieu du trafic arrêté par les cassures. Étant donné que c'est une probabilité qui est appliquée, nous considérons plusieurs simulations du même scénario. Enfin nous supposons que les feux de circulation ne sont pas disponibles après la catastrophe.

Simulation Iteration	1	2	3	4	5
PKP	no	no	135s	no	no
KPP	no	no	123s	no	no
PPE	110s	no	119s	115s	112s
PDLAIS	103s	no	101s	no	no

TABLE 7.6 – Résultats en temps de parcours du véhicule d'urgence (si il arrive à destination) sur la carte de Cologne en cas de tremblement de terre

Le tableau 7.6 montre si le véhicule d'urgence est arrivé à destination selon le modèle, en cas de tremblement de terre. Si il ne parvient pas à sa destination, la valeur *no* est enregistré. Nous remarquons que *PKP* et *KPP* ne sont pas performants, cela provient du calcule des k chemins jusqu'à la destination qui limitent les possibilités (ces k chemins sont longs et donc la possibilité de rencontrer des chemins impraticables est grande). Le modèle *PDLAIS*, plus performant, utilise de l'information locale, mais il est fortement dépendant de l'état de l'infrastructure et de la position des intersections communicantes par rapport au trajet de l'ambulance. Enfin, le modèle *PPE*, utilisant la phéromone localement, donne le plus de chance à l'ambulance d'arriver à destination. En effet, il permet une plus grande possibilité de chemin, choisi pas à pas par le véhicule, de manière locale. La solution locale *PPE* est la plus robuste dans ce cas précis d'événement catastrophique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

7.5 Conclusion

Dans ces trois modèles de crowdsourcing, le véhicule est considéré comme une fourmi qui cherche son chemin jusqu'à sa destination. Le trajet est construit avec les informations en phéromone, reçues et échangées avec les autres véhicules croisés au cours du temps (communication V2V). Cette phéromone indique la qualité d'un lien en temps de parcours mais aussi sa fiabilité dans le temps grâce au phénomène d'évaporation. Deux de ces modèles se focalisent sur le chemin entier : *PKP* et *KPP*. Ce dernier intègre les phéromones directement dans le calcul du plus court chemin, tandis que le premier utilise les phéromones indépendamment du calcul. Dans le troisième modèle, le véhicule se concentre uniquement sur les phéromones autour de lui (*PPE*). Ces modèles permettent une amélioration du temps de parcours et du temps d'attente. Leurs résultats sont proches de ceux du modèle du chapitre précédent (modèle de prise de décisions locales à des intersections communicantes). La communication V2I et la communication V2V impliquant la même restriction, à savoir que l'information connue par les véhicules est partielle, sont performants. De plus, ces modèles ont montré leur capacité à s'adapter à un environnement dynamique, particulièrement *PPE* en cas d'accident, d'acte terroriste et de tremblement de terre. Ainsi le modèle utilisant la phéromone de manière locale est le plus performant en cas d'évènements imprévisibles dans le réseau. Le potentiel de ce service bio-inspiré, n'utilisant qu'une information partielle du réseau, est révélé dans le cas d'un trafic réel normal dans la ville de Cologne avec le modèle utilisant toute l'information en phéromone de la carte (*KPP*), mais aussi en cas d'événements imprévisibles perturbant fortement le réseau véhiculaire avec le modèle utilisant l'information locale (*PPE*).

La prochaine étape serait d'optimiser la complexité des deux modèles se focalisant sur le chemin du véhicule en entier. En effet, dans ces deux modèles, nous utilisons l'algorithme de Yen permettant de calculer k chemins différents. Cette optimisation, nous permettrait de tester des valeurs plus grande de k sur une carte plus importante. Cependant, l'algorithme de Yen ajoute de la complexité et du temps de calcul. Le dernier modèle (*PPE*) qui n'utilise que de l'information locale en phéromone pour choisir le chemin, est une alternative intéressante. Des tests de ce dernier dans d'autres environnements permettraient de compléter l'étude. Enfin, ce modèle couplé à celui du chapitre précédent, avec la communication V2I à des points stratégiques dans le ville, pourrait donner des résultats intéressants à étudier. Ces deux modèles pourraient se compléter, ou au contraire se perturber l'un l'autre. Une harmonisation serait alors nécessaire au niveau applicatif.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 8

Conclusions et travaux futurs

8.1 Résumé et perspectives techniques à court et moyen termes

Le travail présenté dans cette thèse porte sur des applications et des services dans le contexte des systèmes de transports intelligents, en prenant en compte toutes les difficultés réelles liées : à l'environnement, à l'accès à l'information, aux standards de communication, aux conditions actuelles du trafic urbain ou encore aux comportements humains. L'état de l'art sur les projets et les services actuellement disponibles ou pensés autour du véhicule connecté a montré la volonté d'aller vers un véhicule connecté complètement autonome et personnalisable. Cependant, une transition entre le véhicule d'aujourd'hui capable de réunir des données sur son environnement pour améliorer la sécurité et le véhicule autonome du futur, est nécessaire. Ceci implique donc de prendre en compte le manque d'information, l'environnement dynamique incluant les infrastructures existantes, les événements imprévisibles ou encore les réactions des conducteurs. Ainsi, à travers différentes échelles : de la petite permettant des tests réels à la plus grande en simulations, nous avons proposé des applications portant sur l'optimisation et la fluidification du trafic, incluant les contraintes citées précédemment et amenant des solutions alternatives proches de solutions optimales. Nous avons également enrichi les traces synthétiques réelles en mettant à disposition celle que nous avons produit sur le rond-point Europarc à Créteil.

Une classification selon la complexité des services ITS dans notre état de l'art, montre l'écart entre les applications de sécurité actuelles visant à valider cette technologie et la voiture du futur autonome. Il est nécessaire de considérer les contraintes de l'environnement. Ainsi nous avons montré qu'à travers des applications simples utilisant la communication V2V et V2I, nous sommes capables d'obtenir de bonnes performances en ayant des prises de décisions locales, distribuées avec un accès seulement à des informations partielles.

Afin de tester nos services, la méthodologie adaptée a été de considérer différentes échelles. Nous avons montré le passage possible du réel à la simulation afin de pouvoir étendre les simulations dans les chapitres suivants. Ainsi une petite échelle, nous a permis des tests réels de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

communication afin de valider la communication véhiculaire selon les standards en cours et montrer son interopérabilité à l'échelle européenne. Cette plate-forme de tests réels, nous a permis de tester le service GLOSA en grandeur nature. La corrélation entre les résultats réels et simulés ont ainsi validé le modèle de simulation. Nous avons montré qu'une échelle plus grande pose des problèmes de passage à l'échelle. Ainsi la topologie du terrain, les flux véhiculaires, le programme des feux de circulation ont des propriétés très variées et influencent considérablement les résultats de simulation. Nous avons démontré qu'une approximation des données réelles peut mener à des interprétations erronées. Certains modèles classiques provoquent ainsi des comportements irréalistes si la connaissance des données réelles n'est pas établies. Mais d'autres modèles comme celui de Weibull-Pareto correspondent à la réalité. Le travail en amont pour collecter les données et les rendre fidèles à la réalité n'est pas négligeable et souligne l'importance d'une connaissance réelle et précise à une échelle locale. La trace synthétique réelle issue de ce travail a été mise à disposition de la communauté sur le web. Ce genre de données manque cruellement dans le domaine des études sur les réseaux véhiculaires.

Enfin, les traces à l'échelle d'une ville demande une investigation autre et un travail considérable, peu de trace de ce type sont disponibles, ainsi celle portant sur la ville de Cologne a été utilisée durant cette thèse pour toutes les simulations à grande échelle.

Ces différentes échelles nous ont permises de proposer des simulations de services véhiculaires V2V et V2I. Ainsi à petite échelle nous avons mis en évidence le potentiel de GLOSA avec la communication entre un véhicule et un feu de circulation. GLOSA permet de réduire les rejets en CO2 mais aussi de fluidifier le trafic normal en diminuant les temps d'attente. Cependant les limites en performances en cas de congestion restent à explorer, tout comme l'impact d'une coordination de différents feux de circulation.

L'échelle du rond-point, nous a permis de montrer qu'un algorithme simple permettant une anticipation pour rentrer dans le rond-point de manière fluide grâce à une communication décentralisée V2V, était plus performant que le système actuel de feux de circulation. De plus un équipement à hauteur de 30% donne des résultats significatifs en temps pour traverser le rond-point et nous évitons la congestion dans ce dernier. Notre solution est également résistante à des comportements humains différents, aux différentes densités véhiculaires et aux rayons de communication. A fortes densités ce dernier doit être supérieur à 100 mètres pour obtenir des résultats significatifs. De plus une perte de 20% à 40% n'entraîne pas de baisse de performance, ainsi tous les messages ne sont pas utiles. Cela indique qu'une considération de 80% à 60% des conflits est suffisant au bon fonctionnement de l'algorithme. Ainsi, le système est donc performant en cas de mauvaise qualité du canal ou sous un autre point de vue, si le canal est de bonne qualité il n'est pas nécessaire de calculer tous les conflits, la quantité de données ainsi est plus faible. Ce chapitre a montré qu'avec un algorithme simple, la fluidité d'un rond-point complexe avec de multiples feux peut être améliorée grâce à la communication véhiculaire décentralisée entre les véhicules, tout en étant performant en cas de perte de paquet ou d'augmentation de la densité véhiculaire ou encore de comportements humains.

Enfin, la dernière échelle nous a permis de mettre en place un service de recherche de chemin performant permettant un compromis entre la consommation et le temps de parcours tout en ayant un accès limité à l'information. Ainsi en connectant que certaines intersections

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

dans la ville, à savoir les plus congestionnées, nous sommes en mesure d'améliorer le temps de parcours, la consommation et le temps d'attente de manière globale avec beaucoup moins de données que dans une solution centralisée tout en étant proche de 5 à 7% de cette dernière. De plus l'application de compromis de recherche du chemin, *Smooth Way*, a montré qu'améliorer la consommation amène à améliorer le temps de parcours dans le réseau.

Dans le dernier chapitre, contrairement au précédent où nous utilisons la communication V2I, nous avons utilisé la communication V2V. La voiture a été assimilée à une fourmi se dirigeant grâce à une carte de la ville parsemée de phéromone soumis au procédé d'évaporation. La phéromone indiquant la qualité en temps de parcours d'un lien. Trois modèles ont été proposés, dont deux basés sur la puissance de la phéromone le long du chemin entier et un autre axé sur les phéromones uniquement autour du véhicule. Nous avons montré pour un trafic normal que les résultats en temps de parcours et en temps d'attente sont proches du modèle PDLAIS du chapitre précédent où certaines intersections sont connectées. Et le modèle utilisant toute l'information en phéromone de la carte est le plus performant en situation normal. Enfin, nous avons testé leur dynamique an cas de catastrophe dans la ville allant d'un accident à l'acte terroriste et au tremblement de terre. Les trois modèles de recherche de chemins à la manière des fourmis donnent des résultats concluants dans ces différents scénarios imprévisibles tels que les accidents ou les actes terroristes, permettant aux véhicules de contourner la zone de danger et de s'évacuer rapidement. Mais le modèle utilisant la phéromone localement montre les meilleurs résultats. En particulier, en cas de catastrophe naturelle il donne plus de chance au véhicule d'urgence pour circuler. Le modèle PDLAIS, utilisant aussi de l'information locale, donne aussi de bons résultats mais celui-ci dépend fortement de l'état de l'infrastructure à ce moment ainsi que de la position géographique de ces dernières. Ainsi les mocèles utilisant des données locales ont leur importance en cas d'évènements imprévisibles dans le réseau véhiculaire.

Par conséquent, dans cette thèse, nous avons montré qu'à travers des décisions prises localement dans la ville à des échelles différentes : de la petite à la grande, avec un accès à l'information partielle dû à l'équipement, à l'infrastructure, à la perte de paquets, nous sommes en mesure d'améliorer le trafic en temps d'attente, temps de parcours ou encore en consommation, tout en étant robuste aux comportements humains ou aux événements dynamiques et imprévisisbles tels que un accident ou une catastrophe naturelle.

Parmi nos perspectives à court et moyen termes, nous souhaitons valider les différentes applications présentées (GLOSA, l'algorithme de fluidification du rond-point,le modèle sur les intersections autonomes, les modèles de crowdsourcing véhiculaire) sur des cartes différentes. Nous souhaitons aussi les tester avec des données réelles de congestion suffisamment importante, pour tester leurs limites. Un élargissement des simulations, sur des étendues plus grandes est également souhaité. Notre trace synthétique réelle du rond-point nous permettra de valider ou non, davantage de modèles liés aux véhicules ou aux feux de circulation. En ce qui concerne les applications, chaque modèle peut-être étendu. Par exemple, GLOSA peut s'appliquer sur des feux coopératifs ou encore le modèle des intersections autonomes peut s'adapter au passage

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

d'un véhicule d'urgence. Cependant, la complexité des modèles et des algorithmes présentés sont à optimiser, afin de les rendre réalisables en conditions réelles. Étant donné que nous n'excluons jamais le conducteur du véhicule dans nos simulations et nos tests, son expérience et son acceptation de nos services, seraient des éléments très intéressants à exploiter. Par exemple, des tests sur le respect des distances de sécurité permettraient d'évaluer ce paramètre clé dans le modèle du rond-point.

8.2 Élargissement scientifique à long terme

Une première perspective très intéressante à notre travail de recherche serait de monter une plate-forme de test afin d'évaluer dans des conditions réelles nos algorithmes, tout comme nous l'avons fait avec le service GLOSA à petite échelle. Les véhicules et les infrastructures équipés de boîtiers de communication V2X, possédant nos algorithmes nous permettraient d'élargir nos résultats et de les valider de manière concrète. Ainsi, un travail d'investigation est nécessaire pour que les algorithmes répondent aux contraintes de tests réels. Leur complexité et leur temps de calcul sont à optimiser afin qu'ils répondent aux exigences imposées par les contraintes de délais en condition réelle. Le réel comportement du conducteur (accélération, décélération, nervosité) est différent de celui de la simulation et donnera également de nouvelles perspectives de recherche. Un déploiement à grande échelle de nos services permettraient de jauger leur potentiel sur le terrain en prenant en compte non seulement les contraintes liées aux véhicules (caractéristiques), aux algorithmes (contraintes fortes de délais) mais également au réseau de communication (boîtiers de communication, latence des messages, perte réelle, qualité du canal). Cette extension de la thèse permettrait de compléter le travail effectué en le projetant dans la réalité.

Aujourd'hui la population est massivement concentrée en milieu urbain ou en périphérie. Cette tendance va s'accentuer dans les années à venir. Une prise de conscience sur les enjeux environnementaux et les contraintes énergétiques est en train d'émergée. Il est donc primordial que nos villes évoluent dans ce sens. La mobilité est au coeur de cette évolution et les nouvelles technologies de communications vont jouer un rôle important. Le concept de villes intelligentes et le véhicule intelligent seront alors indissociables. Ces nouveaux types de véhicules vont s'inscrire naturellement dans ces nouveaux réseaux. Dans cette thèse, nous nous sommes concentrés sur le bien individuel d'un conducteur ou d'un groupe de conducteur, mais si nous voulons vraiment optimiser l'emprunte écologique de nos véhicules sur notre environnement, un esprit collectif et une gouvernance participative seront nécessaires. Nous pouvons imaginer un contrôle des véhicules directement par la ville intelligente et non plus par l'utilisateur ou des applications embarquées dans le véhicule, dans le but de gérer et d'optimiser l'énergie et la pollution. Par exemple, si un taux de pollution, mesuré dans un quartier d'une ville par les objets connectés (bâtiments, infrastructures) dépasse un seuil, la ville sera en mesure d'alerter les véhicules de cette zone et de leur préconiser une redirection ou un ralentissement en temps réel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

En dernier lieu, nous avons pu constater dans notre thèse que la classification sur la complexité des applications dans les ITS a montré une lacune : la connexion entre le véhicule et l'utilisateur. En effet, deux univers se détachent dans notre état de l'art. D'un côté il y a les services focalisés autour du véhicule et de sa sécurité afin de valider cette nouvelle technologie auprès des autorités et de l'autre côté il y a les services de divertissement et d'informations destinés au conducteur ou aux passagers. Les prochains travaux se tourneront vers des services permettant une connexion entre le véhicule, l'utilisateur et le milieu applicatif, afin que le véhicule ne soit plus qu'un simple moyen pour se déplacer d'un point A à un point B mais un outil personnalisé permettant de relier l'identité sociale du conducteur et des passagers au véhicule, à travers différents services. De nos jours, les réseaux sociaux en ligne ont une place importante dans la vie quotidienne, l'idée serait de proposer des applications permettant de continuer la connexion aux réseaux sociaux ou aux services en ligne tout en étant en déplacement et de les mettre à profits durant ces trajets. Ainsi, par exemple, un service proposant des trajets attirés par des points d'intérêts ayant un pouvoir d'attraction selon les préférences, les habitudes, les envies ou encore l'agenda des utilisateurs pourra être mis en place. Concrètement, si l'utilisateur doit prendre du pain en allant chercher son enfant à l'école, les trajets seront proposés selon différents critères sociaux ou véhiculaires : pouvoir se garer ou pas, boulangerie de qualité selon ses amis, boulangerie habituelle, affluence faible à l'heure de passage, pas loin de l'école, etc. Ainsi le service proposera différents trajets selon des gradients déterminés par ces paramètres sociaux. Un modèle à trois échelles apparaît, avec une partie véhiculaire, une partie service et une partie utilisateur (voir le schéma 8.1). Chacune de ces échelles possède sa propre mobilité et ses propres caractéristiques, pourvoir les relier à travers un modèle est une piste exploitable.

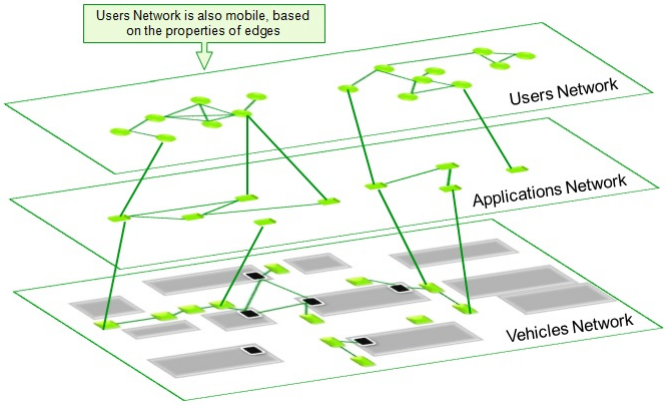

FIGURE 8.1 – Modèle multi-niveau possédant différentes mobilités

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Publications

Conférences internationales

- Partial and Local Knowledge for Global Efficiency in VANET, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard, *IEEE VTC Fall, Vehicular Techonology Conference*, Boston 2015.
- Real scenario and simulations on GLOSA trafic light system for reduced CO2 emissions, waiting time and travel time, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard, Alexandre Garnault, Benazouz Bradaï, Vanessa Picron, *ITS World Congress 2015*, Bordeaux 2015.
- On the Importance of Real Data for Microscopic Urban Vehicular Mobility Trace, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard, *IEEE ITST 2015, International Conference on ITS Telecommunications*, Copenhague 2015.
- Resilient, Decentralized V2V Online Stop-free Strategy in a Complex Roundabout, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard, *IEEE VTC Spring, Vehicular Techonology Conference*, Nanjing 2016.

Conférences et ateliers nationaux

- Modèle multi-échelles pour les services dans les VANET, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard. *Journées Nationales des Communications dans les Transports (JNCT)*, Nevers, France, May 2013,.

Posters

- Modèle multi-échelles pour les services dans les VANET, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard. Poster : *Journées Nationales des Communications dans les Transports (JNCT)*, May 2013
- Service Deployment and Invocation under Delay Constraints in Vehicular Networks. Poster : *Journée des Doctorants Villeurbanne CITI-Lab*, Mars 2014
- Partial and Local Knowledge for Global Efficiency in VANET, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard, Poster : *Journée des Doctorants au laboratoire CITI de Lyon*, Mars 2015

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Rapports de recherche

- VANET Applications : Hot Use Cases. Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard, Julien Dillschneider, et Richard Denis, *arXiv preprint arXiv :1407.4088*, 2014.
- Online Social Network Models : A Survey, Lebre Marie-Ange, Frédéric Le Mouël, Eric Ménard, 2014.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

Bibliographie

[1] Java openstreetmap editor.

[2] Mourad Ahmane, Abdeljalil Abbas-Turki, Florent Perronnet, Jia Wu, Abdellah El Moudni, Jocelyn Buisson, and Renan Zeo. Modeling and controlling an isolated urban intersection based on cooperative vehicles. In *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, volume 28, pages 44–62, 2013.

[3] Zubaida Alazawi, Saleh Altowaijri, Rashid Mehmood, and Mohmmad B. Abdljabar. Intelligent disaster management system based on cloud-enabled vehicular networks. In *International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2011*, pages 361–368, 2011.

[4] Javier Alonso, Vicente Milanés, Joshué Pérez, Enrique Onieva, Carlos González, and Teresa de Pedro. Autonomous vehicle control systems for safe crossroads. In *Transportation Research Part C*, volume 19, pages 1095–1110, 2011.

[5] Tsz-Chiu Au and Peter Stone. Motion planning algorithms for autonomous intersection management. In *Association for the Advancement of Artificial Intelligence, AAAI*, 2010.

[6] Audi. Traffic Jam Assistant, 2012. http ://www.motorauthority.

[7] Reza Azimi, Gaurav Bhatia, Ragunathan Rajkumar, and Priyantha Mudalige. STIP : Spatio-temporal intersection protocols for autonomous vehicles. In *ACM/IEEE 5th International Conference on Cyber-Physical Systems, ICCPS*, pages 1–12. IEEE Computer Society, 2014.

[8] Fadi Basma, Yehia Tachwali, and Hazem H. Refai. Intersection collision avoidance system using infrastructure communication. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC*, pages 422–427, 2011.

[9] Ramon Bauza, Javier Gozalvez, and Joaquin Sanchez-Soriano. Road traffic congestion detection through cooperative Vehicle-to-Vehicle communications. In *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN*, pages 606–612, 2010.

[10] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, and Daniel Krajzewicz. Sumo-simulation of urban mobility-an overview. In *The Third International Conference on Advances in System Simulation, SIMUL*, pages 55–60, 2011.

[11] Anca Berariu. Anticipation of a Driver's Pathway. Master's thesis, Department of Informatics, Technical University of Munich, 2007. JASS Report.

[12] Laura Bieker, Daniel Krajzewicz, AntonioPio Morra, Carlo Michelacci, and Fabio Cartolano. Traffic simulation for all : a real world traffic scenario from the city of bologna. In *Modeling Mobility with Open Data*, pages 47–60. Springer, 2015.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[13] BMW. Connected Drive Concept Car, 2012. http ://www.bmwgroup.

[14] BMW. Semi-autonomous driving system, 2012. http ://www.youtube.

[15] Bosch and University of St.Gallen. Iots lab, 2012. http ://blog.bosch.

[16] Eric Brangier and Javier Barcenilla. Concevoir un produit facile à utiliser. *Paris : Editions d'organisation*, 2003.

[17] C2CC. Car 2 car communication consortium manifesto. 2007.

[18] Cadillac. Semi autonomous super cruise control, 2012. http ://www.autoblog.

[19] B. Chakraborty, T. Maeda, and G. Chakraborty. Multiobjective route selection for car navigation system using genetic algorithm. 2005.

[20] Ing-Chau Chang, Hung-Ta Tai, Feng-Han Yeh, Dung-Linand Hsieh, and Siao-Hui Chang. A VANET-based A* route planning algorithm for travelling time and energy efficient gps navigation. In *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013.

[21] Jie Cheng, Xinmiao Yang, Wei Deng, and Xin Huang. Driver's critical gap calibration at urban roundabouts : a case study in china. In *Tsinghua Science and Technology*, volume 13, pages 237–242, 2008.

[22] Guido Chiappori, Philippe Delarue, and Philippe Le Moigne. Emr and inversion-based control of voltage stabilization system for stop and start vehicles. page 4. Joint Summer School, Energetic Macroscopic Representation, 2014.

[23] Rutger Claes and Tom Holvoet. Maintaining a distributed symbiotic relationship using delegate multiagent systems. In *Proceedings - Winter Simulation Conference*, pages 2981–2990, 2010.

[24] Rutger Claes and Tom Holvoet. Ant colony optimization applied to route planning using link travel time predictions. In *IEEE International symposium on parallel and distributed processing workshops and Phd forum*, pages 358–365. IEEE, 2011.

[25] Rutger Claes and Tom Holvoet. Cooperative ant colony optimization in traffic route calculations. pages 23–34, 2012.

[26] Rutger Claes, Tom Holvoet, and Danny Weyns. A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 12, pages 364–373, 2011.

[27] Lara Codeca, Raphaël Frank, and Thomas Engel. Traffic routing in urban environments : The impact of partial information. In *17th International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC*, pages 2511–2516. IEEE, 2014.

[28] Lara Codeca, Raphaël Frank, and Thomas Engel. Lust : a 24-hour scenario of luxembourg city for sumo traffic simulations. In *SUMO User Conference 2015-Intermodal Simulation for Intermodal Transport*, 2015.

[29] K. Collins and G.-M. Muntean. An adaptive vehicle route management solution enabled by wireless vehicular networks. 2008.

[30] Aurélien Corréïa, A-J Abbas-Turki, Rachid Bouyekhf, and Abdellah El Moudni. A linear model for the analysis of urban traffic networks. In *10th IEEE Emerging Technologies and Factory Automation, EFTA*, volume 2, pages 6–pp, 2005.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[31] Joshua Cregger, Richard Wallace, and Valerie Sathe Brugeman. International survey of best practises in connected vehicle technologies. Technical report, Michigan Department of Transportation, Center for Automotive Research, Transportation Systems Analysis Group, September 2012.

[32] Michael Behrisch Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann and Laura Bieker. Recent development and applications of sumo - simulation of urban mobility. In *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, volume 5, pages 128–138, December 2012.

[33] Gabriel Rodrigues de Campos, Paolo Falcone, and Jonas Sjöberg. Autonomous cooperative driving : a velocity-based negotiation approach for intersections crossing. In *16th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC*, 2013.

[34] Denso. Denso Field Operational Test, 2012.

[35] E W Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. volume 1, pages 269–271. Springer, 1959.

[36] Ronan Doolan and GM Muntean. VANET-enabled eco-friendly road characteristics-aware routing for vehicular traffic. In *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Spring*, pages 1–5, 2013.

[37] Marco Dorigo and Gianni Di Caro. Ant colony optimization : a new meta-heuristic. In *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, volume 2. IEEE, 1999.

[38] Marco Dorigo and L.M. Gambardella. Ant colony system : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. In *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, volume 1, pages 53–66, 1997.

[39] Kurt Dresner and Peter Stone. Multiagent traffic management : A reservation-based intersection control mechanism. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pages 530–537. IEEE Computer Society, 2004.

[40] David Eckhoff, Bastian Halmos, and Reinhard German. Potentials and limitations of Green Light Optimal Speed Advisory systems. In *IEEE Vehicular Networking Conference, VNC*, pages 103–110, 2013.

[41] ETSI. Multi-channel operations for ITS G5, 2012.

[42] ETSI and CEN. State of the art of ITS standards.

[43] Sébastien Faye, Claude Chaudet, and Isabelle Demeure. A distributed algorithm for multiple intersections adaptive traffic lights control using a wireless sensor networks. In *Proceedings of the first workshop on urban networking*, pages 13–18. ACM, 2012.

[44] Sébastien Faye, Claude Chaudet, and Isabelle Demeure. Influence of radio communications on multiple intersection control by a wireless sensor network. In *13th International Conference on ITS Telecommunications*, pages 307–312. IEEE Computer Society, 2013.

[45] Robert W Floyd. Algorithm 97 : shortest path. volume 5, page 345. ACM, 1962.

[46] German Research Centre for Artificial Intelligence. Project siam, 2012. http ://www.eitictlabs.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[47] Ford. Traffic Jam Assist, 2012. http ://www.huffingtonpost.

[48] Ford and Facebook. Hackathon, 2012. http ://www.autoblog.

[49] Damien Fournigault, Vanessa Picron, Frederic Cousin, Philippe Gougeon, Benazouz Bradaï, Philippe Armiroli, and Philippe Baudesson. Co2pilot : coupling optimized 48v hybrid powertrain and driving assistance data fusion for reduced co2 missions. In *SIA International Conference, ICE Powertrain Electrification and Energy Recovery*, 2013.

[50] Sae Fujii, Atsushi Fujita, Takaaki Umedu, Shigeru Kaneda, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino, and Mineo Takai. Cooperative vehicle positioning via V2V communications and onboard sensors. In *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC*, 2011.

[51] Kugamoorthy Gajananan, Sra Sontisirikit, Jianyue Zhang, Marc Miska, Edward Chung, Sumanta Guha, and Helmut Prendinger. A cooperative its study on green light optimisation using an integrated traffic, driving, and communication simulator. In *36th-Australasian Transport Research Forum, ATRF*, 2013.

[52] Raghu K. Ganti, Nam Pham, Hossein Ahmadi, Saurabh Nangia, and Tarek F. Abdelzaher. GreenGPS : A participatory sensing fuel-efficient maps application. In *Proceedings of the 8th international conference on mobile systems, applications, and services*, pages 151–164, 2010.

[53] Mariusz Głabowski, Bartosz Musznicki, Przemysław Nowak, and Piotr Zwierzykowski. Shortest path problem solving based on ant colony optimization metaheuristic. In *Image Processing & Communications*, volume 17, pages 7–17, 2012.

[54] Johnathan Gohde. Learning from previous execution to improve route planning. In *Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling, ICAPS*, 2013.

[55] Jean Gregoire. *Priority-based coordination of mobile robots.* PhD thesis, Ecole Supérieure des Mines, 2014.

[56] Jean Gregoire, Emilio Frazzoli, Arnaud De La Fortelle, and Tichakorn Wongpiromsarn. Back-pressure traffic signal control with unknown routing rates. *arXiv preprint arXiv :1401.3357*, 2013.

[57] Jéôme Härri, Fethi Filali, and Christian Bonnet. Mobility models for vehicular ad hoc networks : a survey and taxonomy. In *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, volume 11, pages 19–41. IEEE, 2009.

[58] P.E. Hart, N.J. Nilsson, and B. Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. volume 4, 1968.

[59] Matthew Hausknecht, Tsz Chiu Au, and Peter Stone. Autonomous intersection management : multi-intersection optimization. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4581–4586, 2011.

[60] Honda. Honda traffic congestion minimiser, 2012. http ://recombu.com/.

[61] Hongyu Huang, Yanmin Zhu, Xu Li, Minglu Li, and Min-You Wu. Meta : A mobility model of metropolitan taxis extracted from gps traces. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[62] Yanguo Huang, Qiang Luo, and Lunhui Xu. Dynamic path optimization method based on ant colony algorithm and group decision-making. In *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2012 10th World Congress on*, pages 300–304. IEEE, 2012.

[63] Intel. Research on augmented reality and in-vehicle infotainment system, 2012. http ://dsc.discovery and http ://www.intel.

[64] Moez Jerbi, Sidi Mohammed Senouci, Tinku Rasheed, and Yacine Ghamri-Doudane. An infrastructure-free traffic information system for vehicular networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 2086–2090, 2007.

[65] Qiu Jin, Guoyuan Wu, Kanok Boriboonsomsin, and Matthew Barth. Multi-agent intersection management for connected vehicles using an optimal scheduling approach. In *International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE*, pages 185–190. IEEE, 2012.

[66] Egil Juliussen. V2x technology's arrival key to accident reduction and prevention. Technical report.

[67] Asaad Kaadan and Hazem H. Refai. iICAS : Intelligent intersection collision avoidance system. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC*, pages 1184–1190, 2012.

[68] Stefan Karpinski, Elizabeth M Belding-Royer, and Kevin C Almeroth. Living on the edge : The distribution of flows across mobile nodes in large wireless networks. Technical report, 2005.

[69] Konstantinos Katsaros, Ralf Kernchen, Mehrdad Dianati, and David Rieck. Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) application using an integrated cooperative ITS simulation platform. In *7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC*, pages 918–923, 2011.

[70] Moritz Killat and Hannes Hartenstein. An empirical model for probability of packet reception in vehicular ad hoc networks. In *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, volume 2009, page 4. Hindawi Publishing Corp., 2009.

[71] Jerry John Kponyo, Yujun Kuang, and Zejiao Li. Real time status collection and dynamic vehicular traffic control using ant colony optimization. pages 69–72, 2012.

[72] Daniel Krajzewicz, Laura Bieker, and Jakob Erdmann. Preparing simulative evaluation of the glosa application. In *Proc. 19th ITS World Congress*, 2012.

[73] Daniel Krajzewicz and Peter Wagner. Ansätze zur kognitiven simulation eines autofahrers. In *Modellierung und Simulation in Mensch-Maschine-Systemen*, page 84, 2004.

[74] Stefan Krauss, Peter Wagner, and Christian Gawron. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. In *Physical Review E*, volume 55, page 5597. APS, 1997.

[75] James H. Lambert, Ayse I. Parlak, Qian Zhou, John S. Miller, Michael D. Fontaine, Thomas M. Guterbock, Janet L. Clements, and Shital A. Thekdi. Understanding and managing disaster evacuation on a transportation network. volume 50, pages 645–658, 2013.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[76] Marie-Ange Lebre, Frédéric Le Mouël, and Eric Ménard. Partial and local knowledge for global efficiency of urban vehicular traffic. In *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC-Fall*, 2015.

[77] Julia Letchner, John Krumm, and Eric Horvitz. Trip router with individualized preferences (trip) : Incorporating personalization into route planning. In *Proceedings of the national conference on atificial intelligence*, volume 21, page 1795, 2006.

[78] Xin Gang Li, Bin Jia, Zi You Gao, and Rui Jiang. A realistic two-lane cellular automata traffic model considering aggressive lane-changing behavior of fast vehicle. In *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, volume 367, pages 479–486, 2006.

[79] Zhixia Li, Madhav Chitturi, Dongxi Zheng, Andrea Bill, and David Noyce. Modeling reservation-based autonomous intersection control in vissim. In *Journal of the Transportation Research Board*, number 2381, pages 81–90, 2013.

[80] Chu Hsing Lin, Jui Ling Yu, Jung Chun Liu, and Chia Jen Lee. Genetic algorithm for shortest driving time in intelligent transportation systems. In *International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering, MUE*, pages 402–406, 2008.

[81] Thorsten Luettel, Michael Himmelsbach, and Hans-Joachim Wuensche. Autonomous ground vehicles, concepts and a path to the future. In *Proceedings of the IEEE Centennial issue*, volume 100, pages 1831–1839, 2012.

[82] Ernesto QV Martins and Marta MB Pascoal. A new implementation of yen's ranking loopless paths algorithm. In *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, volume 1, pages 121–133. Springer, 2003.

[83] Philippe Mathis. *Graphes et réseaux : modélisation multiniveau.* Hermès science : Lavoisier, 2003.

[84] Makoto Matsumoto and Takuji Nishimura. Mersenne twister : a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator, 1998.

[85] Adolf D May. *Traffic flow fundamentals.* 1990.

[86] Mercedes. Fleet tweet, 2011. http ://www.digitalbuzzblog.

[87] Mercedes. Dice, 2012. http ://blog.laptopmag.

[88] Mercedes. Mbrace2, 2013. http ://ces.cnet.com/.

[89] Microsoft and West cost custom. project detroit, 2012. http ://www.istartedsomething and http ://www.geekwire.

[90] Kim Minkyong, David Kotz, and Kim Songkuk. Extracting a mobility model from real user traces. In *IEEE INFOCOM*, volume 6, pages 1–13, 2006.

[91] Ahmed M Mohammed and Adel F Agamy. A survey on the common network traffic sources models. page 103, 2011.

[92] Jegor Mosyagin. Using 4g wireless technology in the car. In *International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON*, pages 1–4. IEEE, 2010.

[93] General Motor, 2012. http ://www.moneycontrol.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[94] General Motor, Bezalel Academy of Art, and Design in Israel. Windows of opportunity, 2012. http ://media and http ://www.gizmag.com/.

[95] Pamela Murray-Tuite and Brian Wolshon. Evacuation transportation modeling : An overview of research, development, and practice. In *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, volume 27, pages 25–45, 2013.

[96] Srinivas Peeta, Yu-Ting Hsu, and Center NEXTRANS. Integrating supply and demand aspects of transportation for mass evacuation under disasters. Technical report, 2009.

[97] Alberto Peinado, Andrés Ortiz, and Jorge Munilla. Secure distributed system inspired by ant colonies for road traffic management in emergency situations. 2013.

[98] Pioneer. Cyber navi, 2012. http ://techon.nikkeibp.

[99] PSA. Peugeot connect applications, 2012-2013. http ://www.psa-peugeot. . . .

[100] Jaime Rodriguez, Isabel de la Bandera, P Munoz, and R Barco. Load balancing in a realistic urban scenario for lte networks. In *Vehicular Technology Conference, VTC*, pages 1–5. IEEE, 2011.

[101] Topi Rönkkö, Liisa Pirjola, Leonidas Ntziachristos, Juha Heikkilä, Panu Karjalainen, Risto Hillamo, and Jorma Keskinen. Vehicle engines produce exhaust nanoparticles even when not fueled. In *Environmental Science and Technology*, volume 48, pages 2043–2050, 2014.

[102] Martin Sachenbacher, Martin Leucker, Andreas Artmeier, and Julian Haselmayr. Efficient energy-optimal routing for electric vehicles. In *Conference on Artificial Intelligence, AAAI*, pages 1402–1407, 2011.

[103] Hojjat Salehinejad and Siamak Talebi. A new ant algorithm based vehicle navigation system : A wireless networking approach. In *International Symposium on Telecommunications*, pages 36–41. Ieee, August 2008.

[104] Pierpaolo Salvo, Mario De Felice, Francesca Cuomo, and Andrea Baiocchi. Infotainment traffic flow dissemination in an urban VANET. In *IEEE Global communications conference, GLOBECOM*, pages 67–72, 2012.

[105] Josef Schlossmacher and Stephan Öri. Audi travolution : efficiently through the city, 2006.

[106] Wenjie Sha, Daehan Kwak, Badri Nath, and Liviu Iftode. Social vehicle navigation : integrating shared driving experience into vehicle navigation. In *Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, HotMobile*. ACM, 2013.

[107] Siemens. Augmented reality navigation, 2005. http ://www.siemens.

[108] David Smith, Soufiene Djahel, and John Murphy. A sumo based evaluation of road incidents' impact on traffic congestion level in smart cities. In *Conference on Local Computer Networks Workshops, LCN*, pages 702–710. IEEE, 2014.

[109] Mohamed Tlig, Olivier Buffet, and Olivier Simonin. Decentralized traffic management : a synchronization-based intersection control. In *IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT*, pages 109–114, 2014.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[110] Toyota. Diji = fun vii = iimo, 2011,2012. http ://www.toyota....

[111] Toyota and Copenhagen Institute of Interaction Design. Windows to the world, 2011. http ://reviews and http ://ciid.

[112] Toyota and Salesforce.com. Smartway, 2011-2010. http ://telematicsnews and http ://www.alinegrippi and http ://www.salesforce.

[113] Sandesh Uppoor and Marco Fiore. Large-scale urban vehicular mobility for networking research. *IEEE Vehicular networking conference, VNC*, pages 62–69, 2011.

[114] Sandesh Uppoor and Marco Fiore. Characterizing pervasive vehicular access to the cellular ran infrastructure : an urban case study. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, volume 64, pages 2603–2614, 2014.

[115] Daniela Varrica, Fabrizio Bardelli, Gaetano Dongarrà, and Elisa Tamburo. Speciation of Sb in airborne particulate matter, vehicle brake linings, and brake pad wear residues. In *Atmospheric Environment*, volume 64, pages 18–24, 2013.

[116] Visteon. Diji = fun vii = iimo, 2012. http ://www.visteon.

[117] Volkswagen. C3world, connected car in a connected world, 2007-2012. http ://www.c3world.de and http ://voiturecommunicante.blogspot.

[118] Volkswagen, 2012. http ://www.youtube.

[119] Volvo. Sartre, 2009-2012. http ://www.sartre and http ://www.euronews and http ://www.autoblog.it/post.

[120] Steffen Walz and Wahl Daniel. Future Urban Personal Mobility, 2011.

[121] Yue Wang, Guoxin Xue, and Shiyu Long. An improved ant colony algorithm for vehicle shortest path problem. In *Conference Anthology, IEEE*, pages 1–3, 2013.

[122] Axel Wegener, Michał Piórkowski, Maxim Raya, Horst Hellbrück, Stefan Fischer, and Jean-Pierre Hubaux. Traci : an interface for coupling road traffic and network simulators. In *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium*, pages 155–163. ACM, 2008.

[123] Lawrence M. Wein, Youngsoo Choi, and Sylvie Denuit. Analyzing evacuation versus shelter-in-place strategies after a terrorist nuclear detonation. In *Risk Analysis*, volume 30, pages 1315–1327, 2010.

[124] Christian Weiß. V2X communication in Europe, From research projects towards standardization and field testing of vehicle communication technology. In *Computer Networks*, volume 55, pages 3103–3119, 2011.

[125] Wisinee Wisetjindawat, Hideyuki Ito, and Motohiro Fujita. Integrating a stochastic failure of the road network and a road recovery strategy into the planning of goods distribution in the aftermath of a large-scale earthquake. In *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, number 15-4165, 2015.

[126] Brian Wolshon and Ben McArdle. Temporospatial analysis of hurricane katrina regional evacuation traffic patterns. In *Journal of Infrastructure Systems*, volume 15, pages 12–20. American Society of Civil Engineers, 2009.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés

[127] Government of Japan. Working Group for Planning Against Tokai Earthquake under Cabinet Office. Reports on damages to lifelines and transport facilities. 2013.

[128] Jia Wu, Abdeljalil Abbas-Turki, and Abdellah El Moudni. Intersection traffic control by a novel scheduling model. In *International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics, SOLI*, pages 329–334. IEEE, 2009.

[129] Jia Wu, Abdeljalil Abbas-Turki, and Abdellah El Moudni. Contextualized traffic controlling at isolated urban intersection. In *The World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, WMSCI*, 2010.

[130] Khalil M Yousef, Mamal N Al-Karaki, and Ali M Shatnawi. Intelligent traffic light flow control system using wireless sensors networks. In *Journal of Information Science and Engineering*, volume 26, pages 753–768, 2010.

[131] Xiao Zhang, Enrique Onieva, Asier Perallos, Eneko Osaba, and Victor C S Lee. Hierarchical fuzzy rule-based system optimized with genetic algorithms for short term traffic congestion prediction. In *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, volume 43, pages 127–142, 2014.

[132] Jiazhen Zhou, Rose Qingyang Hu, and Yi Qian. A scalable vehicular network architecture for traffic information sharing. In *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, volume 31, pages 85–93, 2013.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI007/these.pdf
© [M-A. Lebre], [2015], INSA Lyon, tous droits réservés