HAL
open science

Contribution des communications intervéhiculaires pour la conception de systèmes avancés d'aide à la conduite

Samer Ammoun

To cite this version:

Samer Ammoun. Contribution des communications intervéhiculaires pour la conception de systèmes avancés d'aide à la conduite. domain_stic. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. Français. NNT : 2007ENMP1517 . pastel-00003671

HAL Id: pastel-00003671

https://pastel.hal.science/pastel-00003671v1

Submitted on 6 May 2008

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.

Collège doctoral

ED n° 431 : Information, communication, modélisation et simulation

N° attribué par la bibliothèque

|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité "Informatique temps réel, robotique et automatique"

présentée et soutenue publiquement par
Samer AMMOUN

le 13 décembre 2007

Contribution des communications intervéhiculaires pour la conception de systèmes avancés d'aide à la conduite

Directeur de thèse : Fawzi NASHASHIBI

Jury

M. Jacques Ehrlich	Rapporteur
M. Mohamed Shawky	Rapporteur
M. Abdelaziz Bensrhair	Examinateur
M. Alexis Dubrovin	Examinateur
M. Claude Laurgeau	Examinateur

Table des matières

Remerciements **11**

Résumé **13**

Abstract **15**

1 Introduction **17**
1.1 Les systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS) 20
1.2 Les systèmes coopératifs d'assistance à la conduite 23
1.3 La communication dans le domaine automobile : V2I vs. V2V 25
1.4 Conclusion 27

2 Etat de l'art **33**
2.1 Introduction 34
2.2 V2V : un capteur générique sur le véhicule 34
2.3 Aspects économiques de la pénétration du marché 38
2.4 Sécurité et authenticité de l'information 42
2.5 Les technologies de communication existantes 47
2.5.1 Wifi 52
2.6 Exigence du protocole de communication 56
2.6.1 Couche physique 57
2.6.2 Couche liaison 58
2.6.2.1 ALOHA 60
2.6.2.2 Carrier Sensing Multiple Access/Collision Avoidance . . . 61
2.6.2.3 Wireless Token Ring Protocol 63
2.6.3 Couche réseau 65
2.6.3.1 Proactif / Reactif 66
2.6.3.2 Uniforme / Non-uniforme 66
2.6.3.3 Unicast / Multicast 66
2.6.3.4 Mono-canal / Multi-canal 67
2.6.4 Couche application 70

2.7 Conclusion 71

3 Architecture de communication 79
3.1 Matériel de communication 83
3.2 Logiciel de communication 86
3.2.1 Validité des données 92
3.3 Performance de la communication 92
3.3.1 La portée de la communication 93
3.3.2 La bande passante 98
3.3.3 La variation du débit en fonction de la distance 99
3.3.4 La variation du débit en fonction de la vitesse relative 101
3.3.5 La vitesse maximale des deux véhicules 105
3.3.6 Le temps d'accrochage 106
3.3.7 La latence 107
3.3.7.1 Latence informatique 109
3.3.7.2 Latence mesurée par MAPS distribué 109
3.4 Conclusion 113

4 Prévention du risque sur les intersections 117
4.1 Accidentologie sur les intersections 120
4.1.1 Typologie des carrefours 120
4.1.2 Causes d'accidents sur les intersections 122
4.1.3 Statistiques d'accidents 123
4.1.4 Systèmes d'assistance actuels sur intersections 125
4.2 Conception du système de prévention de risque 125
4.2.1 Détection des véhicules 126
4.2.2 Les paquets d'informations échangées 128
4.2.3 Détection de l'approche de croisement 129
4.2.4 Prédiction des trajectoires 130
4.2.5 Les erreurs sur la prédiction des trajectoires 132
4.2.6 Indices de risque et de dangerosité 136
4.3 Scénarios étudiés 137
4.3.1 Trajectoires rectilignes 138
4.3.1.1 Spécificité de la prédiction 138
4.3.1.2 Détection de collision sur l'horizon temporel 139
4.3.1.3 Indice de risque 139
4.3.1.4 Expérimentations 142
4.3.2 Trajectoires croisées : tourner à gauche 147
4.3.2.1 Spécificité de la prédiction 148
4.3.2.2 Indice de risque 148

4.3.2.3 Expérimentations 148
4.4 Conclusions et recommandations 150

5 Aide à la décision dans un changement de voie 155
5.1 Introduction 156
5.2 Définition d'un changement de voie 156
5.3 Statistiques d'accidents 159
5.4 Les étapes de changement de voie 159
5.5 Système de décision de changement de voie 160
5.6 Modélisation de la manœuvre du changement de voie 162
5.6.1 Accélération latérale 165
5.6.2 Vitesse 166
5.6.3 Accélération longitudinale 166
5.6.4 Courbure 168
5.6.5 Validation expérimentale 168
5.7 Estimation du risque de collision 171
5.8 Indice de risque 174
5.9 Expérimentations 174
5.10 Conclusion 177

6 Conclusion 181

A Caractéristiques du point d'accès DWL 2100+ 187

B Calibration GPS/Caméra 191

Table des figures

1.1 La fusion vision-laser pour la détection d'obstacles sur la route 22
1.2 Les projets de recherche en conduite coopérative 25
1.3 La communication V2I entre un véhicule et une station de base 26
1.4 La communication V2V directement entre les véhicules 27

2.1 Les portées et les champs de vision des capteurs de perceptions par rapport à la communication 37
2.2 Le taux de pénétration de la communication V2V sur l'ensemble de la flotte de véhicules paramétré par le pourcentage de nouveaux véhicules équipés par cette technologie 40
2.3 La version finale du 802.11p est prévue fin 2008 55
2.4 Les sept couches du modèle OSI 56
2.5 Les méthodes de gestion d'accès au canal de transmission dans les réseaux sans fil 59
2.6 Le problème de nœud caché 63
2.7 Le taux d'erreur en fonction de la densité des véhicules par Km 64

3.1 La nouvelle Flotte de véhicules composée de quatre Citroën C3 80
3.2 Le prototype LARA Renault Espace et l'ensemble des capteurs embarqués 81
3.3 L'architecture interne des C3 LARA 82
3.4 La chaine de liaison entre le PC embarqué et le point d'accès Wifi via la carte Ethernet 85
3.5 La portée théorique des outils de communications en fonction de la sensibilité du récepteur et paramétré par la puissance du signal émis 86
3.6 L'approche Escalier ou "Staircase" 88
3.7 La modélisation de notre approche de communication à trois couches . . . 89
3.8 Un diagramme Maps pour la gestion des interdistances entre les véhicules. Le composant MapsPcap collecte les informations en temps réel pour les transmettre 90
3.9 L'interface du composant MapsPcap pour la gestion des communications V2V 91

3.10 Un exemple de paquets communiqués : le champ ID désigne le véhicule *Lara1* qui échange un paquet pour la gestion des interdistances (ACC), les données échangées sont les positions GPS, la vitesse du véhicule et l'état des freins 91
3.11 A gauche : le site de test dans un environnement urbain, le cercle désigne la position de *Lara1* et les flèches décrivent le déplacement de *Lara2* ; A droite : en bleu les positions de *Lara2* de son propre GPS et en rouge les mêmes positions reçues par *Lara1* 95
3.12 La distance entre *Lara1* et *Lara2* en fonction du temps durant le test dans un environnement urbain 96
3.13 La distance entre *Lara1* et *Lara2* durant le test dans l'environnement péri-urbain 96
3.14 La distance entre *Lara1* et *Lara2* durant le test sur autoroute 97
3.15 La portée maximale obtenue durant les tests 97
3.16 La capacité maximale de production de débit par les systèmes informatiques embarqués 98
3.17 Le débit mesuré en nombre d'octets par seconde échangés à travers le système de communication Wifi 99
3.18 Le site de l'expérimentation sur le débit avec le parcours de *Lara1* et *Lara2* 100
3.19 L'histogramme du débit en fonction des distances entre les véhicules 101
3.20 En haut, l'évolution de la distance entre les deux véhicules, et en bas le pourcentage de débit correspondant à cette distance 102
3.21 *Lara2* effectue une trajectoire circulaire autour de *Lara1* 103
3.22 La variation de la vitesse en fonction du temps pendant l'expérience 104
3.23 L'évolution du débit reçu durant l'expérience 105
3.24 L'histogramme des valeurs minimales et maximales du débit de communication en fonction de la vitesse pendant l'expérience 106
3.25 La distribution des points de communication autour de la position de *Lara1* 107
3.26 La distribution des distances minimale, moyenne et maximale pour différentes valeurs de la vitesse 108
3.27 Le pourcentage de débit maximal et minimal en fonction de la vitesse . . . 109
3.28 La vitesse de *Lara1* comme reçu par *Lara2* 110
3.29 De haut en bas, la trajectoire des deux véhicules, la vitesse relative et la distance entre les deux véhicules 111
3.30 La latence informatique mesurée sur un ensemble de 12000 paquets. 112
3.31 Le temps de propagation des paquets entre l'ordinateur maître et celui en esclave 113
3.32 La précision de la synchronisation entre le maître et l'esclave 114

4.1 Un carrefour urbain de type croix 118

4.2 temp : a. carrefour en croix ; b. carrefour giratoire 121
4.3 La visibilité sur carrefour 122
4.4 Organigramme de la gestion des intersections 127
4.5 La mesure de la distance de visibilité par communication sur croisement . . 128
4.6 La détection de l'approche d'un carrefour à partir des trajectoires des véhicules 130
4.7 La détection d'un choc entre deux véhicules à travers l'intersection de deux cercles du modèle 132
4.8 Le filtrage des positions est effectué à la base d'un filtre de Kalman 133
4.9 En bleu, les positions GPS brutes et en rouge, les positions lissées pas le filtre Kalman proposé 136
4.10 a- croisement directe, b- tourner à gauche, c- tourner à droite 138
4.11 La collision est seulement possible entre le temps t_1 et t_2 140
4.12 La fonction du risque 141
4.13 En bleu, l'angle d'orientation du *lara1* et en rouge l'angle d'orientation du *Lara2* 142
4.14 A gauche, la trajetoire de *Lara1* et à droite l'angle du volant, l'état des freins et la vitesse respectifs de *Lara1* 143
4.15 A gauche, la trajetoire de *Lara2* et à droite l'angle du volant, l'état des freins et la vitesse de *Lara2* respectifs 143
4.16 Les trajectoires prédites des deux véhicules vues par *Lara1* 144
4.17 A gauche, les trajectoires des deux véhicules et à droite la distance correspondante 145
4.18 De haut en bas : le TTC, La durée prévue du choc et le pourcentage de cercles impliquées en fonction du temps de l'expérience comme estimés par *Lara1* 146
4.19 Scénario 2 : *Lara1* veut tourner à gauche tandis que *Lara2* veut passer l'intersection 149
4.20 De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara1* pendant le test 150
4.21 De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara2* comme reçu par *Lara1* pendant le test 150
4.22 Le temps d'arrivée TA de *Lara2* à la zone de conflit 151

5.1 (a) Suivi par un véhicule plus rapide, (b) Insertion ou rabattement pour permettre une insertion, (c) Sortie ou préparation de sortie, (d) dépassement d'un véhicule plus lent, (e) Ajout ou suppression de voie 158
5.2 Système de décision interne au conducteur 161
5.3 Exemple d'un changement de voie 163

5.4 La trajectoire paramétrée entre les deux limites acceptables de m 169
5.5 De haut en bas, de gauche à droite, les profils X et Y, Les vitesses selon X et Y, les accélérations longitudinale et latérale 170
5.6 En rouge, le signal du feu clignotant et en bleu l'angle de braquage durant le changement de voie 171
5.7 L'une des trajectoires du véhicule sur les autoroutes durant l'acquisition des exemples de changement de voie 172
5.8 Des exemples de trajectoires de manœuvres de changement de voie 172
5.9 Les trajectoires réelles de changement de voie en comparaison avec la zone de couverte par notre modèle 173
5.10 De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara1* pendant le test 175
5.11 De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara2* comme reçu par *Lara1* pendant le test 176
5.12 En bleu (resp. en rouge), l'historique de déplacement de *Lara1* (resp. *Lara2*). En vert,(resp. en magenta), la prédiction de déplacement de *Lara1* (resp. *Lara2*) 177
5.13 Le temps à collision pendant le test 178

B.1 Le klaxon virtuel 192
B.2 Transformation du repère absolu au repère lié à la voiture 194
B.3 L'angle de l'orientation de la centrale pris à l'arrêt 195
B.4 Comparaison entre l'évolution de l'angle alpha entre INS, GPS, angle de GPS validé et la fusion entre GPS validé et INS 196
B.5 En bleu la dérive de l'angle de la centrale et en rouge la droite des moindre carrée 197
B.6 Evolution des différents angles 198
B.7 La projection de la position 3D de *Lara2* dans le flux vidéo de *Lara1* . . . 199

Remerciements

A mes parents

Résumé

Les systèmes avancés d'assistance à la conduite automobile ont comme objectif d'apporter de l'intelligence au véhicule en l'équipant d'un ensemble de capteurs extéroceptifs et proprioceptifs. L'approche classique consiste à doter le véhicule de capacités de perception pour lui permettre de connaître son environnement sans interaction intelligente avec cet environnement. Cette approche dite autonome a montré cependant des limites liées à la portée et à la précision des capteurs utilisés.
Le grand développement et l'évolution rapide dans le domaine des télécommunications sans fil ont rendu possible de re-penser le modèle de conduite automobile en introduisant la notion de coopération entre les véhicules.
Le travail de standardisation d'un protocole de communication est en cours d'élaboration mais le succès de l'introduction de cette technologie dans le domaine véhiculaire est fortement corrélé à la mise en oeuvre de services et d'applications réalistes et à forte valeur ajoutée pour l'utilisateur final.
L'établissement d'une liste d'applications réalistes requiert un soin particulier surtout que les applications proposées dans la littérature ne sont pas actuellement réalisables techniquement et leur acceptabilité par le grand public n'est pas encore établie ni garantie.
Pour combler ce manque, nous avons essayé à travers cette thèse de nous focaliser sur la conception de nouveaux systèmes coopératifs d'assistance à la conduite pour l'amélioration de la sécurité routière. Le but de la thèse est de prouver la faisabilité des applications coopératives avec le matériel de communication existant et d'étudier l'apport de cette technologie dans la prévention des collisions entre les véhicules.
Le travail réalisé pendant la thèse couvre un domaine très large. D'abord, nous proposons une architecture de communication sans fil basée sur la norme 802.11 et nous étudions à travers des campagnes de test l'adéquation de cette architecture avec les exigences des applications coopératives en termes de portée, de débit et de latence.
Sur la base de cette architecture et après une étude statistique des accidents sur les routes, nous avons expérimenté notre système dans deux types d'applications dans lesquelles la coopération peut avoir une valeur ajoutée par rapport au système autonome :
- La prévention de risque à l'approche d'une intersection
- L'assistance lors d'un changement de voie
Pour chacun de ces deux scénarios, nous avons mis en application un système de prédic-

tion et de prévention de risque de collision entre les véhicules à travers des tests réels sur la plateforme expérimentale de véhicules intelligents LaRA.

Abstract

The advanced driver assistance systems aim to introduce intelligence into the vehicle by equipping it with a set of proprioceptive and exteroceptive sensors. The classic approach is to provide the vehicle with the ability to perceive its environment (as a standalone system) without any intelligent interaction from this environment. This autonomous approach has shown some limits related to the perception range and the accuracy of the utilized sensors. The recent developments in the field of wireless telecommunications has made possible to re-think the driving model by introducing the concept of cooperation between the vehicles.
The standardization of a communication protocol for the automotive domain is being prepared but the successful introduction of this technology is strongly correlated to the implementation of realistic services with real added value to the end user.
The establishment of this list of realistic applications gets more importance especially that the applications proposed in the literature are not currently available at the technical level or psychologically acceptable to the general public. To bridge this gap, we wanted to focus in this thesis on the design of new cooperative driver assistance systems for the improvement of road safety. The aim of the thesis is thus to demonstrate the feasibility of cooperative applications with existing communications equipments and to study the contribution of this technology in the prevention of collisions between vehicles.
The work carried out during the thesis covers a wide area. First, we propose an architecture for wireless communication based on the 802.11 standard, and we explore the performance of our system through campaigns to test the adequacy of this architecture with the requirements of the cooperative applications in terms of range, throughput and latency.
Based on this architecture and after a statistical study of accidents on the roads, we exploited our system in two types of applications in which cooperation can have an added value compared to the autonomous system :
- The risk assessment on intersection approach
- The assistance during a lane change
For each of these two scenarios we have implemented a system of collision risk prediction and prevention between vehicles and performed real tests on the experimental prototyping platform LaRA.

Chapitre 1

Introduction

Au même titre que la roue, l'automobile fut une des inventions phares de l'humanité. Un retour sur 100 années de passion permet de découvrir de nombreuses histoires et anecdotes qui ont accompagné cette aventure. Citons tout d'abord le "fardier à vapeur" de Joseph Cugnot qui atteignit en 1769 pas moins de 4 km/h et une autonomie de 15 minutes ! Le moteur à explosion a été inventé par Etienne Lenoir en 1860 puis arriva l'ère du moteur quatre temps avec Daimler puis Benz (respectivement 1872 et 1882).

En France, il faut attendre 1898 - année du premier salon de l'automobile à Paris - où Louis Renault construisit seul sa première voiturette ; ce fut un déclic. Ainsi, en l'an 1900, il faudrait compter en France 2897 voitures, 53000 en 1910 puis 90000 en 1919 (contre 6 millions aux EU !), année où André Citroën introduisit la production en grande série avec près de 100 voitures par jour. 10 ans plus tard, on comptait 1 million de voitures, un chiffre qui doublait en 1935. L'entre deux-guerres fut l'âge d'or de l'automobile dans le monde et dès 1945 le parc automobile mondial a triplé pendant les Trente Glorieuses passant de 10 à 30 millions de voitures.

La prolifération d'engins de cette taille ne pouvait passer sans conséquence sur l'organisation sociale et sociétale. Conscient de la spécificité de ces engins, dès 1893, on instaura le "certificat de capacité valable pour la conduite des véhicules". Celui-ci donna naissance dès 1922 au fameux "permis de conduire" dont l'obtention est aujourd'hui conditionnée par une connaissance et une application parfaite du code le route. Le rôle de celui-ci est de régir le comportement des conducteurs pendant leur conduite mais aussi de gérer leurs interactions avec les autres éléments de l'environnement routier dans l'objectif de gérer d'une manière optimale le trafic routier et d'accroître la sécurité pour les différents acteurs (conducteurs, véhicules, riverains,...). Ainsi, le respect du code de la route établit implicitement une forme de coopération indirecte entre les conducteurs.

Pour améliorer cette coopération, des organes ont été greffés progressivement à tous les véhicules tels que le klaxon, les clignotants, les feux de stop, les feux de détresse,... Cette forme de "communication" est aujourd'hui indispensable mais néanmoins insuffisante par rapport aux nouveaux besoins et surtout au regard des technologies émergentes capables de fournir des aides substantielles. En effet, le volume et la forme du trafic routier de nos jours, les capacités des véhicules actuels, la diversité des comportements et des profils des conducteurs sont des paramètres qui peuvent expliquer en partie une situation inextricable où toutes les initiatives sont les bienvenues. L'aménagement du territoire et le développement contrôlé d'un réseau routier sans cesse évolutif en constitue une des réponses ; en revanche, celle-ci reste limitée tant les poids de l'histoire et de la géographie sont contraignants notamment en Europe.

D'autres solutions plus techniques ont vu le jour toujours dans le but d'améliorer les conditions de conduite et de les sécuriser : les systèmes de transport intelligents STI (en anglais ITS[1]). Ces systèmes dits "intelligents" s'appuient en réalité sur des concepts innovants ainsi que des technologies implantées à la fois dans l'infrastructure et à bord des véhicules. Ils visent à améliorer le rendement du trafic routier, réduire le nombre d'accidents sur les routes et à proposer de nouveaux services au conducteur (confort, divertissement,...).

Les STI constituent aujourd'hui un axe véritable de recherche. Les chercheurs travaillant dans ces domaines tentent d'élaborer des stratégies et de concevoir des systèmes complexes interagissant à la fois avec l'environnement, avec le véhicule mais aussi avec le conducteur à travers des interfaces passives et actives dédiées. Parmi les systèmes les plus élaborés, nous trouvons les systèmes avancés d'aide à la conduite (en anglais ADAS[2]). Ces systèmes sont conçus afin d'être intégrés aux véhicules et fournissent par leur fonctionnement des aides aux conducteurs sous formes passive ou active allant d'une simple transmission d'une information au conducteur, passant par la transmission d'alertes sensorielles et allant jusqu'à la prise en main réelle et le contrôle partiel ou total des commandes du véhicules. Pour réaliser ces fonctionnalités, ces systèmes se basent sur l'analyse d'informations recueillies pendant la conduite à travers des capteurs dits "intelligents" installés à bord ou dans l'environnement et communiquant avec les organes décisionnels du véhicule par voie physique ou non filaire.

Les capteurs en question ont été traditionnellement des capteurs extéroceptifs classiques permettant de percevoir l'environnement ou alors des capteurs proprioceptifs permettant de retourner les paramètres et l'état interne du véhicule. A ces capteurs traditionnels, nous avons vu arriver de nouveaux capteurs pas moins intéressants que sont : les systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS[3]) qui calculent et retournent la position absolu du véhicule, les cartographies numériques embarquées qui fournissent des informations statiques localisées relatives à la position courante du véhicule, et enfin les médias de communication qui permettent d'envoyer et d'échanger des informations statiques ou dynamiques avec l'infrastructure ou bien avec les autres véhicules ou autres acteurs de la route.

Les systèmes d'aide (ou d'assistance) à la conduite sont passés par plusieurs stades de développement pour arriver à ce que nous nous sommes accordés d'appeler communément *ADAS*.

[1] Intelligent Transportation Systems
[2] Advanced Driver Assistance Systems
[3] Global Navigation Satellite System

Dans ce chapitre, nous allons proposer un classement de ces systèmes d'assistance selon deux grandes catégories : autonomes et coopératives.

Dans le premier paragraphe, nous exposerons notre vision des systèmes d'assistance à la conduite autonome ou traditionnelle. Nous présenterons ainsi les travaux de recherche effectués dans ce domaine en général et nous en profiterons pour présenter plus particulièrement l'expérience et le "savoir-faire" de l'équipe STI du centre de robotique.

Dans un deuxième temps, nous présenterons notre définition de la nouvelle génération d'ADAS coopératifs. Dans cette partie, nous présenterons l'intérêt grandissant que suscite cette approche dans le domaine des STI. Et puisque cette approche est rendue possible grâce aux avancements dans le domaine des télécommunications, nous introduisons dans le troisième paragraphe les différentes approches de communication sans fils dans le domaine véhiculaire.

1.1 Les systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS)

Comme tout système autonome, un système ADAS doit intégrer trois éléments primordiaux : la perception, la décision et l'action (en latin : *Pervidere, Cogitare, Agere*). Cela se traduit par un système ayant la faculté de :

- Percevoir et connaître l'environnement de conduite : cette connaissance comprend à la fois la détermination de la position précise du véhicule sur l'infrastructure routière et la perception de l'environnement de navigation et des objets fixes et mobiles qui l'entourent.
- Traiter les informations hétérogènes recueillies afin d'y extraire des paramètres aidant la prise décision : par exemple, pour un système estimant un risque de conduite quelconque (e.g. risque d'accident), la connaissance de l'environnement est utilisée pour calculer un risque de collision. Cette estimation est élaborée grâce à des algorithmes de prédiction de mouvement de toutes les véhicules dans la zone de conduite concernée.
- Agir en fonction d'un critère (par exemple, pour diminuer le risque d'accident) : une fois le risque déterminé, une action est à prendre pour réduire au minimum ce risque ou pour limiter les dégâts qui en résultent si le choc est inévitable. Trois niveaux ou modes d'action sont alors possibles :

  Mode informatif : dans ce mode, le système se contente d'informer le conducteur au bon moment de la nature du risque entrepris et de son niveau ;

  Mode suggestif : dans ce mode, le système informe le conducteur puis lui suggère des actions concrètes à entreprendre ou bien un comportement adéquat (ralentir, accélérer, freiner, braquer, corriger sa trajectoire, etc.) ;

Mode actif : à ce stade, c'est le système qui prend le contrôle effectif à travers les actionneurs du véhicule. Aujourd'hui, ce dernier mode est proscrit à la fois par les constructeurs qui jugent prématuré d'introduire sur le marché des systèmes qui dégagent les conducteurs de leur responsabilité, et par la majorité des conducteurs qui peuvent se partager la méfiance de systèmes qui pourraient au pire mettre leurs vies en danger et au mieux les priver de la maîtrise de leur bien ! En attendant, il faudrait que le système ADAS fonctionne optimalement selon les deux premiers modes.

Dans la première phase d'acquisition de connaissance sur l'environnement de conduite, les systèmes actuels d'aide à la conduite utilisent deux sortes de capteur ou source d'informations :

1. Les capteurs proprioceptifs : comme son nom l'indique, ce genre de capteurs fournit des informations internes aux véhicules. Ces capteurs se limitent donc à renvoyer des informations sur le comportement et sur les paramètres du véhicule lui-même sans se préoccuper directement de l'environnement de conduite. Toutefois, ces capteurs fournissent des informations précieuses en termes de définition et de détermination du risque. Citons à titre d'exemple les informations sur la vitesse du véhicule acquises grâce à l'odométrie, sur les accélérations (par gyromètres), sur l'état du moteur du véhicule, sur l'état des freins, sur l'adhérence à la route, etc. Ces informations forment une source d'informations indispensable pour connaître, dans un premier temps, l'état et les capacités du véhicule lui même pour mieux définir le risque encouru et pouvoir proposer, dans un second temps, des solutions pour réduire ce risque.

2. Les capteurs extéroceptifs : contrairement à la première catégorie, ces capteurs embarqués sur le véhicule auront pour mission de percevoir l'environnement de navigation du véhicule. Ils fournissent des informations sur le véhicule lui-même et sur les objets qui l'entourent à partir de leur perception de l'environnement. Citons à titre d'exemple la vision monoculaire ou stéréoscopique, la télémétrie laser ou radar, les ultrasons, etc. Ces capteurs acquièrent des informations sur les objets dans l'environnement de conduite ; Ce genre de capteurs est plutôt utilisé dans la classe des ADAS autonomes puisqu'ils n'exigent aucune interaction physique avec l'environnement et se contentent de percevoir passivement.

Remarque : les récepteurs GPS quant à eux qui, par réception des signaux multi satellitaires déterminent la position absolue du véhicule, sont classés dans la catégorie des capteurs autonomes puisque les informations fournies par ces systèmes ne sont pas données par des éléments de la route et ne donnent d'information sur aucune structure à risque.

Les ADAS actuels tentent d'exploiter au maximum ces deux familles de capteurs. De plus, les systèmes de fusion multi-capteurs sont utilisés dans le but d'accréditer l'information en provenance de plusieurs sources et de proposer des services de plus en plus fiables.

Parmi les services proposés par les ADAS autonomes :
- La détection et la prévention de collisions avec les véhicules environnants
- la détection des vulnérables sur et à côté de la route
- La prévention de sortie de route
- ...

Ces ADAS ont montré des limites dues à la nature même des capteurs, à leur champ de visibilité et à leur portée. La recherche se focalise donc maintenant sur la manière de fusionner ces informations dans le but de définir un meilleur modèle de risque et de prévention de risque.

Depuis sa création en 1987, Le centre de robotique de l'école de Mines de Paris a trouvé dans le domaine des STI un champ d'expérimentations de la robotique moderne dans un domaine applicatif. Le centre a travaillé dans de très grands projets nationaux (PROMETHEUS, ARCOS, SYSTEM@TIC,...), européens (Carsense, REACT, Com2REACT, CAMELLIA,...) et internationaux en partenariat avec les grands groupes industriels du monde automobile tels que le groupe VALEO, Renault, PSA...et d'autres grands acteurs des transports et des systèmes de transport intelligents.
Parmi les travaux de recherche du centre de robotique, nous citons les travaux de fusion de multicapteurs pour la détection des obstacles. Ce système d'assistance consiste à fusionner les outils de vision monoculaire et un télémètre laser pour la détection d'obstacles sur la route [11]. L'interface de ce système est illustrée sur la figure 1.1.

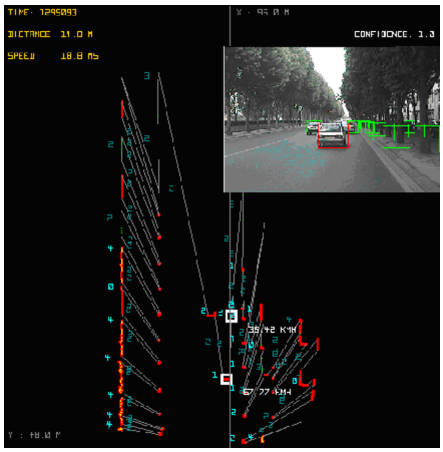

FIG. 1.1 – La fusion vision-laser pour la détection d'obstacles sur la route

1.2 Les systèmes coopératifs d'assistance à la conduite

La révolution dans le domaine des télécommunications mobiles et le succès qu'ont remporté les systèmes de communications sans fil ont été deux facteurs qui ont poussé les chercheurs dans le domaine des STI à vouloir introduire cette technologie dans le domaine automobile. Les possibilités offertes par les télécommunications ont permis de repenser un modèle de conduite où la coopération entre les véhicules requiert une position importante dans la prévention de risque. En effet, la communication doit pouvoir assurer le canal de communication jadis perdu entre les conducteurs et qui était remplacé par les règles strictes du code de la route.
Nous définissons un système coopératif d'assistance à la conduite comme un système ADAS classique dont la particularité est de pouvoir recueillir - grâce à un ou à plusieurs moyens de télécommunication - des informations externes appartenant à l'infrastructure routière et/ou aux éléments statiques et mobiles de la route. Contrairement aux systèmes autonomes, ce sont les objets de l'environnement qui communiquent des informations sur eux-mêmes. Ces informations, généralement non mesurables avec les capteurs classiques, sont fournies avec une meilleure précision puisque les informations ne sont pas altérées par les méthodes de mesure traditionnelles.

Selon cette définition, nous pouvons classer les systèmes coopératifs en deux catégories selon le degré d'interaction durant le partage d'informations :

1. Système coopératif informatif : dans ce premier niveau de coopération, le partage des données locales est effectué dans l'objectif d'informer les autres agents de la route. Suite à ce partage, les processus cognitive et active sont ensuite effectués dans chaque véhicule sans interaction avec l'environnement.

2. Système coopératif décisionnel : dans ce stade, la coopération s'étend aux étapes de l'estimation de risque et de la prise de décision. Il s'agit alors d'une prise de décision distribuée. Ainsi, les agents mobiles se mettent à négocier mutuellement une solution optimale à la configuration présente.

Tout le long de ce mémoire de thèse, nous allons nous focaliser logiquement sur les systèmes informatifs qui nous paraissent plus réalistes sur les plans fonctionnel et conceptuel. Ceci est d'autant plus raisonnable que les travaux de recherche sont en train de démarrer dans ce domaine.

La conduite coopérative a attiré beaucoup d'attention depuis plusieurs années. Ceci peut expliquer le nombre grandissant de projets qui utilisent la communication au service de la sécurité routière active. Ces projets s'étendent principalement entre les Etats Unis, le Japon et l'Europe. Dans la suite, nous allons faire un rappel des initiatives et projets

qui ont marqué le domaine de la coopération pour la sécurité routière.

En effet, le concept de la conduite coopérative fut introduit dans les années 90 par le JSK[4] au Japon. Le concept était à l'origine destiné à des applications de suivi en peloton (ou *"Platooning"*). Techniquement, ils utilisaient des communications à courtes portées. Les projets de recherche dans ce domaine se poursuivent jusqu'à nos jours dans le cadre du projet *SmartWay*. Après une série de démonstrations dans les années 90, la Demo 2000 a marqué la chronologie du développement japonais en conduite coopérative avec la démonstration de la faisabilité d'un peleton de cinq véhicules. Dans cette démonstration, les cinq véhicules étaient amenés à effectuer des tests de suivi, de formation de peleton, de dislocation de peleton, insertion, départ, etc. Cette démonstration a mis en évidence l'importance de l'introduction de la communication V2V[5] dans la gestion des flottes de véhicules sur les autoroutes [2].

Aux Etats Unis, c'est autour des deux initiatives *Vehicle Infrastructure Integration (VII)* et *Vehicle Safety Communication (VSC)* que tourne le développement des applications de conduite coopérative comme par exemple dans la Demo'97 du projet Californien PATH [3].

En Europe, le projet initiateur était *PROMETHEUS* au début des années 90. Les projets qui lui ont succédé peuvent être classés en deux catégories : des projets de communication informative et des projets de communication coopérative.

Parmi les approches informatives, nous pouvons citer : *IVHW* (Inter-Vehicle Hazard Warning), *Fleetnet*, *WillWarn*, *SafeSpot*, *NOW*, etc... Et parmi les approches coopératives, nous citons : *Cartalk2000*, *Promote-Chauffeur* et *Invent-VLA*.

Le projet *CarlTalk2000*[7] vise à concevoir, tester et évaluer des applications de coopération par communication directe entre les véhicules.
Le projet allemand ambitieux *Fleetnet*[6] vise à fournir un service internet à bord des véhicules.
le projet *NOW* (network-on-wheels)[5], qui se termine en 2007, est un projet qui utilise les communications V2V et V2I dans le domaine de la sécurité active.
Plusieurs projets *PReVent* [4] ont une thématique qui tournent autour de la conduite coopérative comme *SafeSpot* [8] par exemple qui marie les communications V2V et V2I pour définir une marge de sécurité autour du véhicule. Le projet Coopers [10] traite le problème de communication véhicule infrastructure à courte portée.

Sur la figure 1.2, nous illustrons l'historique des projets aux USA, au Japon et en Europe. Cette figure a été produite par Matthias Schulze dans son document "Daimler Chrysler" de Février 2006 [9].

[4]Association of Electronic Technology for Automobile Traffic and Driving
[5]Vehicle to vehicle

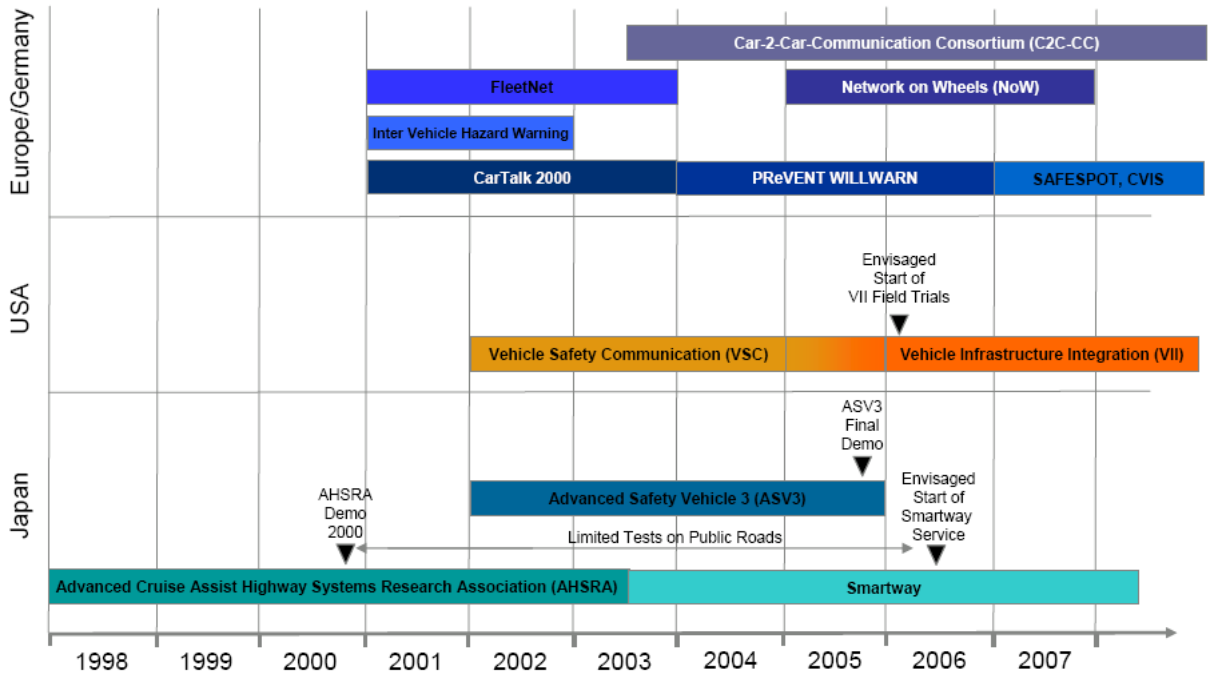

FIG. 1.2 – Les projets de recherche en conduite coopérative

1.3 La communication dans le domaine automobile : V2I vs. V2V

Le développement et la propagation rapide des réseaux mobiles sans fil motivent la transposition de ce modèle réussi dans le domaine automobile. Comme dans les réseaux sans fil classiques, le réseau véhiculaire peut être classé en deux grands groupes :

1. Les réseaux centralisés : dans ce genre de réseau, il existe une infrastructure (ou des infrastructures) qui centralisent les communications des mobiles pour les acheminer vers leurs destinations finales. Le schéma illustratif traditionnel est le réseau cellulaire. Dans ce type de réseau, la couverture du service est assurée à travers un ensemble de stations de base. Chaque mobile reste en communication uniquement avec la station de base qui couvre la zone dans laquelle il se trouve. Il existe bien sûr des mécanismes de gestion de passage d'une cellule à l'autre (handover) et de passage entre des réseaux hétérogènes. Dans le domaine véhiculaire, ce type de réseau est connu sous le nom de communication véhicule à infrastructure ou V2I (figure1.3). Notons que ceci couvre partiellement la réalité de ce réseau puisque la communication se fait mutuellement entre les véhicules et l'infrastructure dans les

deux sens. En effet, le véhicule communique ses données à l'infrastructure. De son côté, l'infrastructure rassemble toutes les données en provenance de tous les véhicules, les traitent et renvoient des analyses et des consignes à chaque véhicule. La répartition, les dimensions des zones de couverture, la disposition des stations de base, la gestion de passage entre deux zones, etc... constituent toujours des sujets ouverts à la recherche scientifique.

2. Les réseaux point à point ou Ad Hoc[6] : dans ce type de réseau, la communication se fait directement entre les véhicules sans passage à travers une infrastructure de gestion de la communication (figure 1.4). Ce réseau constitue une variété du réseau Manet[7] appelée Vanet (pour Vehicle Ad Hoc Network). Dans ce document, nous avons choisi d'adopter l'appellation V2V (pour Vehicle to Vehicle communication) qui reflète d'une manière simple la réalité de la communication directe inter-véhiculaire.

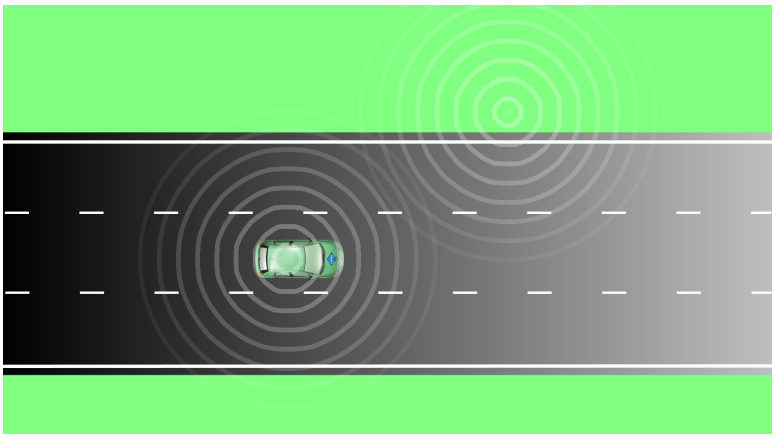

FIG. 1.3 – La communication V2I entre un véhicule et une station de base

Le tableau 1.1 présente quelques caractéristiques spécifiques pour ces deux approches. Sur ce tableau, nous présentons aussi notre analyse des avantages et inconvénients de chacune de ces approches par rapport à leur utilisation dans le domaine véhiculaire.

En effet, la gestion centralisée des communications dans le V2I fait que les informations échangées sont plus crédibles. La vue d'ensemble du trafic fait que les analyses sont plus globales. Ces avantages font que cette approche est plus adaptée aux problèmes de gestion de trafic surtout que ces problèmes sont peu contraints par les délais de communication et de traitement. A noter toutefois que cette technologie doit assumer un coût

[6]Ad hoc est une locution latine qui signifie qui va vers ce vers quoi il doit aller
[7]Mobile Ad Hoc Network

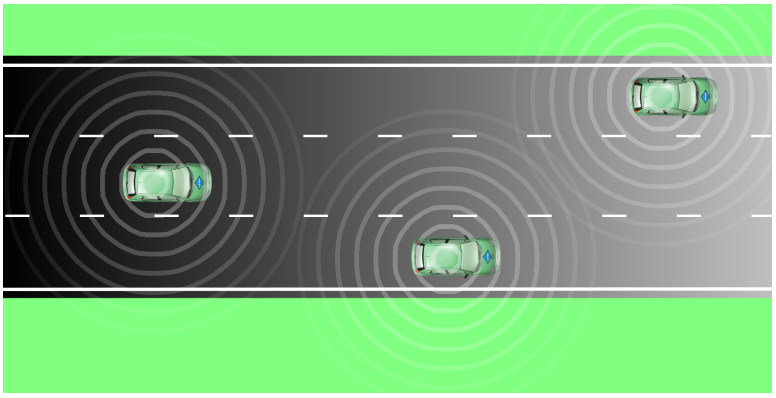

FIG. 1.4 – La communication V2V directement entre les véhicules

considérable pour assurer une couverture acceptable.

Cependant, l'approche V2V permet d'échanger localement les informations entre les véhicules qui existent dans une zone géographiquement limitée avec un délai temporel restreint. Ces deux caractéristiques favorisent l'utilisation de cette approche pour les problèmes de prévention de collision entre les véhicules pour améliorer la sécurité routière. Cependant, cette approche présente les inconvénients d'être peu robuste vis a vis des problèmes de la sécurité des informations échangées, de nécessiter une architecture de communication complexe et d'exiger un taux suffisant d'équipement de véhicules pour assurer un service fiable.

Par ailleurs il existe une catégorie d'applications de nature ambiguë en termes de classification en V2V ou V2I. Il s'agit de la communication entre les véhicules et des terminaux fixes de l'infrastructure routière (aspect V2I) d'une façon directe sans traitement centralisé de l'information (aspect V2V). A titre d'exemple, nous pouvons citer les communications entre les véhicules et les panneaux de signalisation, les feux tricolores, le péage à distance, etc. Nous remarquons que le concept applicatif de cette catégorie est plus proche de celui des réseaux V2V que des réseaux V2I puisque l'échange d'informations reste direct sans une approche globale de traitement des données.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept de la conduite coopérative rendu possible grâce aux avancées dans le domaine de la communication sans fil.

	V2I	V2V
Informations locales	-	+
Authenticité	+	-
Globalité	+	-
Sécurité de l'information	+	-
Latence	-	+
Coût de mise en œuvre	-	+
Complexité du réseau	+	-
Fréquence de mise à jour	-	+
Utilité % au taux de pénétration	+	-

TAB. 1.1 – Comparaison entre les deux approches V2V et V2I

L'utilisation de cette communication dans le domaine de l'assistance à la conduite fait naître une nouvelle génération des systèmes ADAS.
Selon l'architecture du schéma de communication utilisé, nous présentons une classification des réseaux véhiculaires en deux catégories V2I et V2V ;

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux problèmes de prévention des risques de collisions. Cette catégorie d'applications est plus adaptée à un schéma de communication V2V à faible latence avec des informations locales.

Dans le premier chapitre, nous présenterons un tour d'horizon de l'état de l'art dans le domaine des communications V2V. Nous étudierons ainsi les divers problèmes technologiques et les solutions proposées par les différents laboratoires de recherche. Nous évoquerons aussi les applications susceptibles d'être déployées à la base de cette technologie. Nous consacrerons un paragraphe aux technologies existantes et les défis qui se présentent vis à vis du déploiement de ce réseau sur le plan socio-économique.

L'objectif de notre travail consiste à proposer des solutions coopératives pour éviter les collisions sur les routes. Nous avons été amenés ainsi à préparer notre cadre applicatif. En effet, le chapitre 2 détaille notre procédure d'équipement de notre flotte de véhicules. Nous présenterons notre choix des outils de communication et le travail d'adaptation effectué pour les intégrer sur nos plateformes embarquées. Cette étude ne se limitera pas à une simple description, elle portera aussi sur des campagnes de caractérisation de performance en termes de portée, de débit, de latence, etc. Cette étude quantitative se fait à travers des campagnes de mesure spécialement menées dans cet objectif.

Nous commencerons ensuite le travail de conception de services et d'applications pour

la sécurité routière sur la base de cette architecture de véhicules intelligents. Nous avons choisi d'étudier deux scénarios dans lesquelles les ADAS traditionnels ont montré des limites et pour lesquels nous cherchons à étudier l'apport de la communication V2V par rapport à l'approche classique.

Ainsi, le chapitre 3 sera consacré à l'étude de la prévention des risques de collision à l'approche des intersections. Suite à une étude statistique et conceptuelle des accidents sur les intersections, Notre approche se déroule à travers des séries de tests effectués entre deux véhicule à l'approche d'une intersection. La prévention de risque se fait à travers la prédiction des trajectoires des véhicules et l'estimation du temps précis de l'impact en comparaison avec le temps de réaction du conducteur.

Comme deuxième application, nous avons choisi d'assister le conducteur pour la prise de décision durant une manœuvre de changement de voie. Nous proposerons dans ce chapitre un modèle de mouvement durant un changement de voie. En se basant sur ce modèle, l'estimation de risque est effectuée grâce aux trajectoires des véhicules impliqués dans la manœuvre. L'assistance au conducteur se fera donc par la détermination d'un niveau de risque de collision avec les véhicules qui entourent le véhicule en changement de voie.

Enfin, le dernier chapitre sera dédié à nos conclusions sur l'ensemble du système présenté. Nous proposons aussi notre vision des perspectives de recherche dans ce domaine riche et prometteur.

Bibliographie

[1] Sadayuki Tsugawa, "Inter-Vehicle Communications and their Applications to Intelligent Vehicles : An Overview", ITS Research Group, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Namiki 1-2-1 Tsukuba East, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8564 Japan

[2] Sadayuki Tsugawa, "An Introduction to Demo 2000 : The Cooperative Driving Scenario," IEEE Intelligent Systems, vol. 15, no. 4, pp. 78-79, Jul/Aug, 2000

[3] http ://www.path.berkeley.edu/nahsc/

[4] http ://www.prevent-ip.org/

[5] http ://www.network-on-wheels.de

[6] http ://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet/

[7] http ://www.cartalk2000.net

[8] http ://www.safespot-eu.org

[9] Matthias Schulze, International Initiatives Europe in Comparison to USA and Japan, Telematics Functions, Fev 2006.

[10] http ://www.coopers-ip.eu/

[11] F. Nashashibi, A. Khammari and C. Laurgeau, "Vehicle recognition and tracking using a generic multi-sensor and multi-algorithm fusion approach", In International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2007. Vol. 5, No. 2/2, (ISSN 1471-0226)

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Introduction

Comme présenté dans le chapitre précédent, nous envisageons d'étudier l'apport de la communication V2V directe dans le domaine de la sécurité routière.
Bien que le concept de la conduite coopérative parait bien séduisant sur le plan fonctionnel, le développement d'un support de communication opérationnel nécessite néanmoins des avancées technologiques par rapport à l'existant.
Dans ce chapitre, nous commencerons par définir notre concept d'un réseau de communication V2V et nous présenterons les avantages et les inconvénients de l'intégration de ce nouvel outil sur le véhicule.
Avant d'aborder l'aspect technique de la communication, nous consacrerons deux sections consécutives pour présenter deux défis vitaux pour le succès de l'introduction de ce réseau V2V dans les véhicules de demain. La première section sera dédiée aux procédures économiques d'introduction de cette technologie sur le marché automobile surtout que le concept du réseau véhiculaire V2V souffre du "syndrome réseau". Le deuxième défi sera de garantir la fiabilité du réseau V2V en matière de sécurité de l'information et de la garantie de la vie privée des utilisateurs.
La discussion sur les aspects technologiques commencera alors avec une partie consacrée à la présentation des technologies de communication sans fil qui existent déjà sur le marché et qui sont susceptibles d'être utilisées en V2V.
Dans le reste du chapitre, nous parcourrons en parallèle deux voies : a) une analyse des caractéristiques et des exigences du réseau véhiculaire à partir d'une analyse des exigences des applications en termes de ressources et de fiabilité, et b) les efforts des constructeurs automobiles et des laboratoires de recherche pour la conception d'un système de communication capable de répondre aux exigences de ce réseau émergent. Dans cette étude, nous essayerons de structurer les étapes présentées en respectant l'architecture des sept couches du modèle générique de communication ISO.

2.2 V2V : un capteur générique sur le véhicule

Les systèmes autonomes d'assistance à la conduite se basent sur l'emploi de deux types de capteur :

- Les capteurs proprioceptifs qui fournissent des connaissances internes sur l'état du véhicule comme les odomètres, les récepteurs GPS, les capteurs internes du moteur, les gyromètres, les centrales inertielles, ...
- Les capteurs extéroceptifs qui fournissent des connaissances sur le monde qui entoure le véhicule comme les capteurs de perception (vidéo, laser...), les capteurs de visibilité et de brouillard, etc.

Avec l'introduction de l'outil de communication V2V dans les véhicules, la connaissance de l'environnement de conduite sera enrichie par les informations communiquées par

l'entourage du véhicule. Ainsi, l'outil de communication est perçu sur le plan fonctionnel comme un nouveau capteur dans le véhicule.
Par opposition aux autres capteurs embarqués, ce nouveau capteur a l'originalité d'être un capteur générique dans le sens où il est capable de véhiculer tous types d'information. En effet, les outils de communication ont l'avantage d'être un support transparent vis à vis des informations échangées.
Donc, suivant la nature des informations échangées, nous pouvons classer cette connaissance distribuée entre les véhicules dans deux catégories :

1. Perception distribuée : chaque véhicule aura accès aux données "brutes" des capteurs des autres véhicules. La représentation de l'environnement sera ainsi enrichie par les données provenant par exemple d'un télémètre laser embarqué sur le véhicule voisin. Bien entendu, le recalage de l'ensemble de données dans le même système référenciel spatial et temporel est indispensable avant toute exploitation.
2. Intelligence distribuée : avant d'être communiquées, les informations échangées subissent un traitement local sur le véhicule et seules les données traitées seront envoyées aux autres véhicules. Par exemple, au lieu de communiquer le flux vidéo, chaque véhicule analyse localement son propre flux vidéo afin d'en extraire les informations hétérogènes nécessaires (obstacles, objets, alertes, marquages, etc) puis les envoie aux autres véhicules.

L'avantage de la deuxième approche est que le traitement se fait une seule fois sur un véhicule et que la quantité des informations échangées est bien réduite. Par contre, ceci se fait en dépit de la flexibilité de la première approche : le fait de communiquer des données brutes laisse la liberté à chaque véhicule d'extraire les paramètres qui l'intéressent à partir des données des autres véhicules sans limiter le système ADAS local aux seuls résultats communiqués.

La généricité fonctionnelle de ce nouveau capteur "communication" le rend comparable aux autres capteurs du véhicule sur le plan de la performance. Sur ce plan, le capteur "communication" possède trois principaux avantages par rapport aux autres capteurs :

- La portée de l'information : actuellement les capteurs de perception ont atteint une certaine maturité sur le plan technique. Les travaux d'amélioration se focalisent ainsi sur le développement de nouveaux algorithmes de traitement et d'exploitation de leurs données. En utilisant les capteurs extéroceptifs usuels, la portée de la zone de perception est limitée à une centaine de mètres dans les meilleures des cas. Le radar, par exemple, est capable de détecter des cibles à des distances maximales de 100-150 mètres. En revanche, la notion de la portée en communication est sensiblement différente. Les protocoles de communication ont la possibilité d'œuvrer sur de nombreuses pistes pour acheminer les données le plus loin possible. Parmi

ces pistes figurent la puissance du signal à l'émission, la sensibilité du récepteur, la robustesse du codage vis à vis du bruit, l'existence de relais de l'information, etc. Parmi les technologies de communication sans fil existantes, la portée de l'information peut varier entre des centaines de kilomètres et quelques mètres. L'évolution actuelle dans le domaine de la communication sans fil ad-hoc a rendu possible des technologies qui peuvent être intégrées dans des véhicules et qui ont des portées allant jusqu'à quelques kilomètres. Les équipes de recherche dans le domaine de la conduite coopérative cherchent à définir, en conformité avec les protocoles proposés, une portée jugée suffisante pour le bon fonctionnement de la V2V.
D'autre part, les capteurs de perception usuels possèdent un champ de vision plus ou moins restreint. Pour couvrir tout le champ de visibilité autour du véhicule, il faut utiliser plusieurs capteurs orientés de façon à couvrir le champ demandé autour du véhicule. En revanche, dans le domaine de la communication, le choix des antennes implique l'ouverture du champ de communication. L'utilisation des antennes omnidirectionnelles donne la possibilité de communiquer d'une manière isotrope autour du véhicule avec un champ de visibilité de 360 degrés. L'utilisation des schémas de communication avec des antennes directionnelles ou sectorielles peut être envisageable dans un objectif d'optimisation de l'énergie et de la bande passante. Les autres handicaps des capteurs de perception sont les zones d'occlusion causées par les autres agents présents sur la route, par l'infrastructure routière et parfois par les structures urbaines autour de la route. Selon la technologie utilisée, la communication est souvent capable de "percevoir" à travers ces objets. La communication a aussi la possibilité de fournir des chemins alternatifs aux données qui, en cas de coupure de la communication dans une direction donnée, assurent la fluidité de la transmission.
La communication a aussi l'avantage de rester opérationnelle pendant les conditions météorologiques agressives comme le brouillard et la pluie même si la qualité du signal peut subir des dégradations dans ces cas de figures ; tandis que la vision devient presque inexploitable dans ces conditions. Sur la figure 2.1, nous montrons un schéma comparatif de la portée et de l'angle d'ouverture entre les différents capteurs de perception et la communication. A noter que la portée de la communication est donnée à titre indicatif puisqu'elle dépend de la technologie utilisée.

- La qualité de l'information : les capteurs extéroceptifs renvoient des données brutes dont le traitement permet d'estimer les paramètres de l'environnement de conduite. Cette connaissance sur l'environnement est biaisée par deux sources d'erreur : l'incertitude au niveau de la détection des objets et l'imprécision au niveau de l'estimation des paramètres de l'objet détecté. La précision est un paramètre interne au capteur utilisé tandis que la certitude est souvent liée à l'algorithme de détection. Mais dans le domaine de la coopération, la qualité de la connaissance de l'environnement de

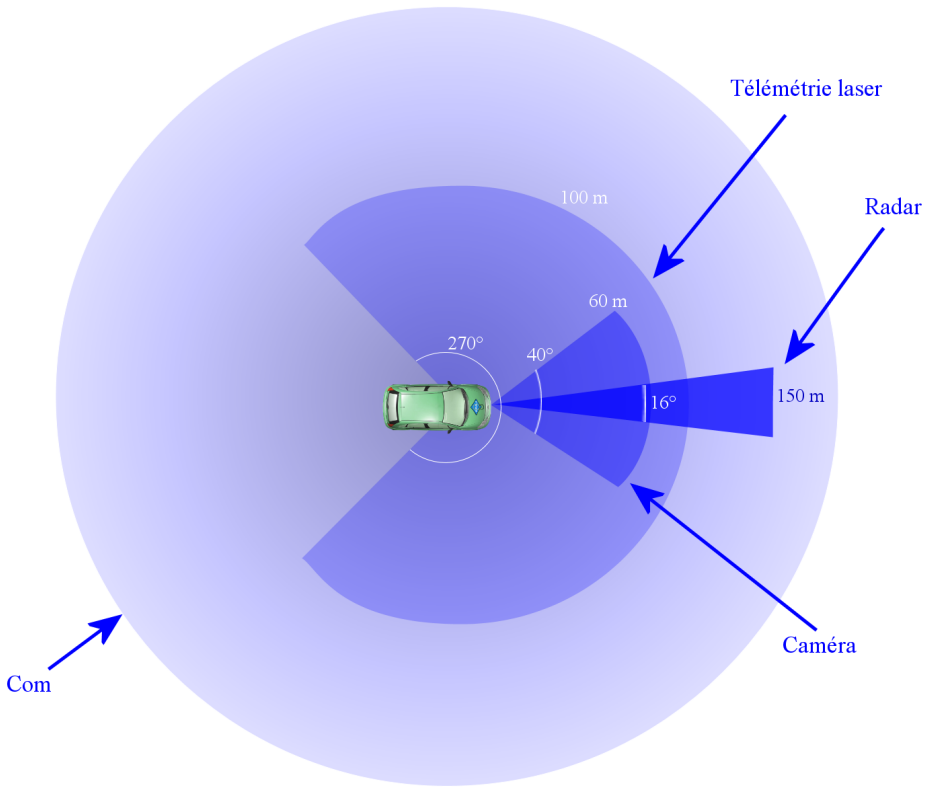

FIG. 2.1 – Les portées et les champs de vision des capteurs de perceptions par rapport à la communication

conduite passe à un autre niveau : au lieu de détecter les véhicules, ce sont les véhicules eux-mêmes qui annoncent leur présence par communication. Le taux de détection, qui était lié à la qualité du capteur et aux algorithmes de traitement, sera donc dépendant de la présence des outils de communication à bord des véhicules et de la fiabilité des protocoles utilisés.
Un autre avantage de la communication est au niveau de l'estimation des paramètres des autres véhicules. En effet, la communication permet donc à chaque véhicule de partager une connaissance de lui-même sans détérioration de la qualité de l'information. La communication permet de récupérer les données des autres véhicules telles qu'elles ont été mesurées sur ceux-ci. L'erreur sur les informations sera donc égale à l'erreur de mesure sur le véhicule même. Prenons l'exemple d'une caméra vidéo embarquée sur le véhicule, nous détectons et estimons la position relative des véhicules dans le champ de vision de la caméra. La mesure de ces positions implique une multitude d'erreurs et d'incertitudes liées à ces processus. Tandis que par le biais de la communication, notre véhicule est censé recevoir les positions GPS de

chaque véhicule voisin. L'erreur de la position des véhicules voisins restera égale à l'erreur sur les positions GPS mesurées sur chaque véhicule.
De plus, la communication peut amener à améliorer la précision des capteurs. En effet, la fusion des flux d'information issus des capteurs embarqués sur plusieurs véhicules peut amener à des estimations plus fiables des données. Ce type d'intelligence distribuée permet de fiabiliser les ADAS actuels en améliorant leur champ de perception et leur précision.

- La nature de l'information : comme présenté précédemment, la communication permet d'échanger toute sorte d'information. La limitation ne vient que de la quantité de l'information capable de passer dans le canal de transmission. Par rapport aux systèmes de perception de l'environnement, les véhicules communicants peuvent donc échanger de nouveaux types de connaissance ; par exemple des informations sur le conducteur, son état, ses intentions, le type de sa conduite, des informations sur la trajectoire à emprunter, des informations sur l'état du véhicule, sa vitesse maximale, son adhérence au sol, sa capacité de freinage, le niveau de freinage exercé, etc. Ce genre d'information non mesurable avec les systèmes de perception traditionnels permet ainsi de perfectionner le système d'assistance à la conduite et par conséquence de concevoir de nouvelles applications pour la réduction du risque de collision avec les autres véhicules sur la route.

Tous ces avantages du nouvel outil de communication embarqué sur les véhicules motivent les constructeurs et les équipementiers automobiles ainsi que les laboratoires de recherche pour développer des standards de communication et de définir des horizons d'intégration de cette technologie dans les véhicules.

2.3 Aspects économiques de la pénétration du marché

Mis à part les défis technologiques liés au déploiement du réseau V2V, l'introduction de cette technologie dans les véhicules grand public souffre du syndrome de "l'effet de réseau". Cet effet signifie que l'utilité d'un service donné est fortement dépendante du nombre total des utilisateurs qui se servent du même système. En d'autres termes, les premiers utilisateurs ne vont pas bénéficier à 100% du produit. Ce syndrome rend délicat la pénétration de ce produit ou service au marché, d'autant plus qu'un seuil de pénétration est nécessaire avant de commencer à tirer profit du produit. Pourtant, il existe de nombreux produits qui ont réussi leur introduction sur le marché malgré cet effet de réseau comme par exemple le téléphone, le fax, les messageries instantanées, les logiciels Peer2Peer, les sites de vente aux enchères sur le net, etc. Dans les réseaux V2V, la qualité des services proposés à base de communication V2V est sensible au taux d'équipement

des véhicules par cette technologie. Cette sensibilité se manifeste à quatre niveaux :

1. La génération du message doit être réalisée par un véhicule équipé. Toute information nécessaire pour un évitement de collision par exemple sera transparente au réseau de véhicules communicants si aucun des véhicules impliqués dans la collision n'est équipé.
2. Un seuil d'équipement S_1 est nécessaire pour maintenir vital un message dans une région donnée pour une période précise. Par exemple l'alerte en amont (d'accident, d'arrivée d'une véhicule prioritaire, fermeture de voie, embouteillage, etc) ne peut être efficace que si un grand nombre de véhicules est alerté.
3. Un seuil d'équipement S_2 est nécessaire pour agir comme des relais afin de pouvoir distribuer l'information sur une zone plus large.
4. Un seuil d'équipement S_3 est nécessaire pour assurer une borne maximale acceptable de délai de communication. Ce délai est parfois vital à certaines applications.

Toute nouvelle technologie peut pénétrer le marché par l'un des deux moyens suivants :

- Une législation favorable à l'intégration de cette technologie : pour pouvoir impliquer les autorités publiques dans l'introduction de cette technologie dans le marché, il faut prouver l'efficacité de la technologie V2V dans le domaine de sécurité routière et de la gestion de trafic.

- Une valeur ajoutée claire et nette pour l'utilisateur final : c'est la voie la plus logique pour assurer une bonne pénétration au sein des véhicules grand public. En effet, la conception des applications attractives pour le consommateur est une étape clé pour pouvoir le convaincre de l'utilité de cette technologie et pour créer ensuite un besoin, voire un désir chez lui pour ce nouvel outil de communication.

Le taux de pénétration est d'ailleurs fortement lié au taux de pénétration des nouveaux véhicules sur le marché. Sur le premier trimestre 2005, en moyenne 180 000 véhicules particuliers ont été vendus chaque mois en France selon le CCFA[1]. Il y a environ 45 millions d'automobiles en France. La figure 2.2 simule un taux de pénétration en fonction du temps exprimé en nombre d'années. Ces droites sont paramétrées par le pourcentage d'équipement des véhicules nouveaux par des moyens de communications. Par exemple, si nous supposons que 25% de nouveaux véhicules sont équipés par la technologie V2V, seulement 3.6% de la flotte des véhicules sera équipée dans trois ans. Avec la même cadence de vente de véhicules neufs et pour un taux d'équipement de 100% de ces véhicules, le chiffre de 100% de véhicules équipés de V2V sur les routes ne peut être obtenu avant 20 ans !

[1] Comité des Constructeurs Français d'Automobiles

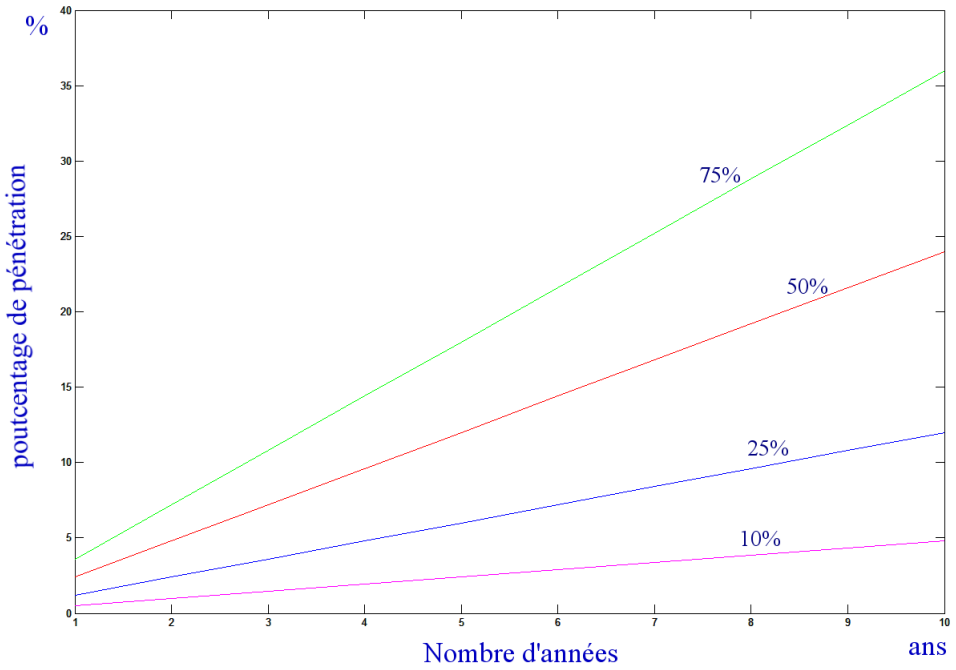

FIG. 2.2 – Le taux de pénétration de la communication V2V sur l'ensemble de la flotte de véhicules paramétré par le pourcentage de nouveaux véhicules équipés par cette technologie

La conception des applications et du service doit donc prendre en compte le délai d'intégration et proposer des services convenables à chaque phase de déploiement du réseau V2V. Ainsi, il doit exister une hiérarchie des applications à proposer selon le niveau de pénétration acquis. En effet, Carter [19] prévoyait en 2005 trois périodes :

1. 2007 à 2011 : il y propose des applications à court terme comme l'alerte en cas de freinage brusque, alerte en cas de non respect de feu tricolore, alerte de vitesse excessive sur virage, ...
2. 2011 à 2016 : pour des applications de moyen terme comme l'alerte avant collision, assistance au changement de voie, assistance sur un Stop.
3. Après 2016 : le taux de pénétration sera assez élevé et la conception de nouvelles applications sera moins contrainte.

L'intégration des outils de communication va se faire très probablement par les constructeurs (ce qui peut être le schéma le plus rassurant pour l'utilisateur final) ou bien par des

fournisseurs ou sous-traitants indépendants qui prendront en charge le développement des terminaux de communication nomades (comme dans le cas des systèmes de navigation). Cette deuxième solution présente l'avantage que le terminal ne serait pas un terminal intégré au véhicule. Ceci facilite le remplacement de celui ci puisqu'en général la durée de vie des véhicules est plus grande que la durée de vie des systèmes de communication. Ce décalage peut peser sur le modèle d'intégration des outils de communication sur les véhicules.

Vis à vis des constructeurs automobiles, l'introduction de la V2V dans les véhicules relève plusieurs particularités :

1. Tous les constructeurs automobiles seraient contraints de coopérer à deux niveaux :
   (a) La standardisation : vu que toutes les applications tirent profit d'un taux élevé de véhicules équipés, c'est dans l'intérêt de tous les constructeurs de converger vers la même technologie finale ou bien d'aboutir à une interopérabilité entre les matériels V2V. Heureusement, les constructeurs se dirigent bien dans ce sens puisqu'ils se regroupent déjà en consortiums : un consortium européen C2C[2] [20] et un autre américain VSCC[3] [21]. L'objectif de ces consortiums est de définir les standards de communication et les applications adéquates.
   (b) Les quotas d'équipement : aucun constructeur ne peut se permettre de démarrer l'équipement de sa flotte avec des outils de communication spécifiques avant les autres constructeurs, parce qu'ainsi il prendra en charge et assurera seul la dure période d'introduction. Un quota d'équipement des véhicules pour chaque constructeur (selon le pourcentage des ventes de nouveaux véhicules par exemple) sera une bonne solution pour assurer une répartition juste des charges entre les constructeurs.
2. Pour encourager les utilisateurs pendant la phase d'intégration, deux solutions sont envisageables :
   (a) Les constructeurs investissent en premier temps en fournissant les outils de communication jusqu'à l'obtention d'un seuil d'équipement satisfaisant. Une fois ce seuil dépassé, les constructeurs peuvent donc commencer à avoir un retour sur investissement en facturant les outils de communication aux acheteurs et en proposant des services payants aux utilisateurs. Par contre, ils ne peuvent pas se permettre de facturer l'accès à la communication dans aucun cas puisque cette procédure aura un impact négatif sur le taux d'équipement et par la suite sur le degré de fiabilité du système.
   (b) Les constructeurs peuvent proposer les fonctionnalités de la communication V2V combinées avec d'autres fonctionnalités plus séduisantes pour le consom-

[2] Car2Car consortium
[3] Vehicle Safety Communication Consortium

mateur. Comme par exemple la combinaison de la fonction V2V avec des fonctionnalités d'interaction avec les infrastructures (telles que la communication avec les feux tricolores, les panneaux de signalisation, etc), ou bien combinée aux outils de communication in-vehicle (avec les assistants personnels et les ordinateurs portables surtout que la technologie 802.11p, qui est fortement pressentie comme solution, est une variante du système Wifi qui est aujourd'hui largement présent dans les terminaux informatiques), etc.

Quel que soit le schéma de l'intégration des technologies V2V, cette phase sera primordiale et aura un impact majeur sur tout l'avenir de cette technologie et de sa survie. En contre partie, le marché de nouvelles technologies a connu dernièrement de multiples réussites de pénétration du marché par des produits souffrant de l'effet du réseau. Ces réussites laissent espérer une introduction réussie de la technologie V2V dans les véhicules de demain. Tout de même, le réseau V2V, avec son impact majeur sur la vie personnelle de tous les gens et de la sécurité des vies, restera un défi énorme à affronter.

2.4 Sécurité et authenticité de l'information

Dans ce paragraphe, nous aborderons le thème de la sécurité des réseaux V2V. Ce sujet est sans contestation le sujet le plus problématique pour l'utilisateur du futur réseau de communication V2V. Même que ce sujet dépasse le cadre de cette thèse, nous tenons particulièrement à y attirer l'attention dans le développement du futur réseau véhiculaire et à schématiser concrètement les soucis des prochains utilisateurs pour pouvoir y faire face.
Ainsi, dans cette section, nous ferons un tour d'horizon sur les éventuelles menaces ou malveillances susceptibles de se produire dans ce type de réseau sans fil. A la suite de cette analyse, nous exposerons les solutions apportées par les chercheurs impliqués dans la définition des normes de sécurité des réseaux Vanets.

A partir des années 80, le développement des réseaux informatiques dans le domaine bureautique et domicile n'a pas été accompagné par un niveau de développement adéquat dans le domaine de la sécurisation de ces réseaux. En effet, l'énorme croissance des réseaux locaux (et entre autres les réseaux sans fil) a rendu plus dangereuses les attaques sur les réseaux informatiques par des pirates informatiques (hackers). Ces multiples attaques ont instauré un sentiment de méfiance entre les utilisateurs et les systèmes informatiques. La transposition de ces vulnérabilités dans le domaine automobile est très dangereuse puisque les enjeux au sein d'un éventuel réseau véhiculaire sont les vies des passagers et des conducteurs. L'idée de créer un réseau de communication véhiculaire doit bien anticiper cet obstacle en élaborant de nouveaux protocoles et mécanismes de protection. Les futurs réseaux V2V donneront lieu sûrement à de nouveaux comportements criminels

et anti-sociaux et ce d'autant plus que l'impact de ce réseau sur les plans social, économique et légal seraient importants. Pourtant, le rôle des protocoles de communication en cours d'élaboration est de définir une stratégie qui répond aux exigences de sécurité de ces nouveaux types de réseau. Néanmoins, les travaux de recherche dans le domaine de la sécurisation des réseaux V2V sont relativement modestes par rapport au niveau critique de l'enjeu.

Les efforts des industriels de l'automobile dans ce domaine sont concentrés dans le consortium C2C et dans le groupe de travail IEEE P1609.2 du consortium DSRC [55].

Il existe des principes généraux que tout protocole de communication pour véhicule doit satisfaire. Nous en avons identifié quelques uns :

- L'anonymat : l'identificateur du véhicule ne doit pas être lié en aucun cas à l'identité du conducteur ou à ses coordonnées.

- L'intimité : les autres membres du réseau ne doivent pas avoir accès aux informations non communiquées du véhicule et de son conducteur.

- La non traçabilité : il ne doit pas être possible de suivre un véhicule identifié dans son déplacement tout au long ou sur une partie de sa trajectoire.

- L'authentification des véhicules : dans le but de différencier un usager normal du réseau d'un autre malveillant, il doit y avoir un système d'authentification d'un nouvel adhérant du réseau afin de pouvoir accepter les messages provenant de sa part.

- L'identification : cette notion permet de donner à chaque véhicule un identifiant unique afin de pouvoir établir la responsabilité des conducteurs sur le comportement de leurs véhicules si nécessaire. Cette notion est contradictoire avec la notion de l'intimité et de l'anonymat. C'est pour cela que l'identité ne doit être divulguée que dans les cas graves comme pour permettre à la police de connaître l'identité des véhicules après un accident ou lors d'un délit de fuite par exemple.

- La plausibilité du message : même provenant d'un nœud valide, un message doit être identifiable en termes de validité du contenu.

- La disponibilité et la robustesse du système : des pannes générales ou partielles ne sont pas tolérées sauf dans des cas extrêmes.

- La non confidentialité des données échangées : une communication inter-véhicule ne

comporte pas en général des informations d'ordre privé ou critique de telle manière qu'on doive recourir à des processus de cryptage de l'information. Notons toutefois qu'il existe des cas où le message doit être crypté lors de l'échange des informations confidentielles de paiement à distance par exemple.

Le non respect d'un de ces principes peut causer des perturbations dans le réseau véhiculaire. L'étude de la nature d'un attaquant (ou adversaire) permet de comprendre sa manière d'agir et de prédire la dangerosité de ses comportements. Afin de mieux comprendre le comportement de ces perturbateurs, nous pouvons les présenter en quatre classes différentes :

- Interne ou externe : l'attaquant peut être un véhicule appartenant au réseau véhiculaire, un terminal qui a réussi à infiltrer le système en passant pour un véhicule authentique ou bien un système informatique externe au réseau véhiculaire et qui se contente en général de l'écoute passive du canal de communication entre les véhicules.

- Actif ou passif : un véhicule malveillant peut se contenter d'écouter passivement les messages entre les différents véhicules sans intervenir dans l'échange d'informations. Ce type d'intrusion a souvent le but de briser la confidentialité d'un véhicule donnée pour la suivre ou pour acquérir des informations privées sur la cible (informations confidentielles de paiement à distance sur les péages par exemple). Une approche plus dangereuse consiste à impliquer le véhicule attaquant dans l'échange des messages. Ainsi, trois niveaux d'attaques sont possibles : au niveau de la couche physique, en brouillant le canal de transmission des données et en causant une défaillance totale du système ; au niveau du routage des données, en empêchant certains messages d'atteindre leurs destinations et finalement au niveau des applications, en fabriquant des messages fictifs ou en falsifiant les données dans un message valide.

- Rationnel ou malveillant : en général, un attaquant malveillant cherche à prouver une capacité ou une réussite personnelle. Pour cela il cherche à détecter des zones de vulnérabilité et à les exploiter pour perturber le système. Tandis qu'un attaquant rationnel est plus dangereux puisqu'il vise en général l'accomplissement d'une tâche spécifique sur le réseau en défaveur (ou en faveur) d'une personne identifiée. Ces attaques rationnelles sont généralement mieux organisées et plus efficaces mais elles sont plus prévisibles que les attaques malveillantes.

- Seul ou associé : comme dans le modèle d'attaque dans les réseaux informatiques, un attaquant peut travailler seul pour organiser et exploiter une faille dans le système ou bien en équipe de plusieurs "pirates". Le travail en équipe permet d'aggraver

l'impact de l'attaque en étalant la zone de la perturbation.

Selon la cible de l'attaque, il existe trois classes d'attaque sur un réseau véhiculaire :

1. Arrêt des services : comme par exemple le DoS (Denial of Service) qui consiste à rendre indisponible le réseau de communication en saturant le canal de telle manière que la communication devient impossible. Ce type d'attaque est d'autant plus facile que le support physique de communication est accessible, ce qui est le cas du réseau hertzien utilisé dans la communication V2V.

2. Altération des données relatives à l'attaquant : il s'agit souvent d'un attaquant rationnel. Il peut chercher à fournir des informations falsifiées sur sa propre position, sa vitesse, etc. dans le but de se dé-responsabiliser lorsqu'il est impliqué dans un accident ou dans un autre acte malfaisant. Un second niveau de malveillance consiste dans ce cas à falsifier l'identité du véhicule et à se passer pour un autre. La plupart des fois, cette attaque a pour but d'imputer les fautes commises par l'attaquant sur les autres.

3. Ciblage des autres véhicules : l'attaque des autres véhicules peut se faire sur trois niveaux :

   - Un "Big Brother" est très inquiétant dans un réseau V2V puisqu'il constitue une atteinte à l'intimité des conducteurs.

   - Diffusion d'informations erronées pour influencer le comportement des autres véhicules comme l'annonce de fausses alertes d'accidents ou la recommandation de trajectoires alternatives.

   - Prise de contrôle du système informatique d'un autre véhicule. Cette main mise peut s'avérer très dangereuse puisqu'elle peut aller jusqu'à engendrer des accidents dramatiques en modifiant les données du véhicule et/ou sa connaissance sur l'environnement.

Vis à vis de ces thèmes aussi critiques que vitaux, les travaux de recherche tentent de trouver des solutions à ces défis. La diversité et la complexité de ces thèmes font que chaque équipe de recherche tente de répondre séparément à un seul des aspects de ce problème. En 2004, Blum et Eskandarian [8] ont essayé de répondre au problème des "collisions préparées" ou selon leur terme "Intelligent collision". Pour éviter ce genre de collisions, leur stratégie consiste à proposer de subdiviser le réseau véhiculaire en zones ou

"clusters". A la tête de chaque cluster un véhicule-chef centralise la gestion de l'authentification des autres véhicules. Le véhicule-chef associe à chaque véhicule une clé PKI[4] comme dans [14]. La communication de toute information se fera donc à travers le véhicule-chef qui re-distribue les informations en unicast pour chaque véhicule à part. En contre partie, cette approche possède plusieurs inconvénients puisqu'elle peut aboutir assez rapidement à un effet de bottleneck (ou goulet d'étranglement) au niveau de la bande passante du véhicule-chef, en plus du problème du choix du véhicule-chef et de sa crédibilité.

Parmi les autres travaux, Parno et Pering proposent dans [9] un ensemble de primitives de solutions sur l'anonymat et l'authentification.
Gerlach dans [10] introduit la notion de confiance dans les communications V2V. Cette confiance s'étale à plusieurs niveaux parmi les couches du protocole utilisé. Elle est établie avec un véhicule sur trois niveaux : 1) un certificat qui permet la vérification de l'identité du véhicule, 2) un système qui donne un taux de crédibilité (ou décrédibilité) des informations en provenance du véhicule suivant l'historique de sa contribution au réseau et 3) une vérification de la plausibilité au niveau de l'information communiquée et la gestion des conflits en cas de contradiction des informations.

Golle et al [18] essaie de remédier aux problèmes de l'attaque de Sybil (un nœud malveillant qui crée des nœuds fictifs sur le réseau). Pour remédier à cette attaque, les auteurs proposent un schéma de vérification de la validité des données en se basant sur l'hypothèse que la probabilité de la participation d'un grand nombre de nœuds dans une attaque est peu probable.

Dans [11], les auteurs proposent le système CARAVAN. Ce système empêche l'utilisation des informations de positions et de vitesse communiquées pour traquer un véhicule. Ils proposent ainsi deux solutions : 1) changement fréquent du pseudonyme du véhicule après une période aléatoire de silence et 2) la formation de groupes dynamiques de véhicules afin de favoriser l'anonymat. Le véhicule serait donc un membre de groupe dont le chef représente une interface (proxy) avec l'extérieur et qui donne des informations générales sur le groupe. Dans le même esprit, [12] propose un mécanisme dans lequel plusieurs véhicules changent de pseudonymes en même temps pour empêcher tout suivi des véhicules.

L'équipe de "Laboratory for Computer Communications and Applications" de l'EPFL[5] aborde le sujet de la sécurité des réseaux de véhicules en essayant de résoudre le dilemme de l'intimité et l'anonymat du véhicule tout en gardant la responsabilité du conducteur

[4]PKI (PUBLIC KEY INFRASTRUCTURE) : système de cryptage à deux clés asynchrones. Une clé, privée, pour crypter les messages ; l'autre, publique, pour les décrypter

[5]Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

sur le véhicule et sur son comportement. En effet, Hubaux introduit dans [13] l'utilisation de la licence d'une plaque électronique ELP[6] qui représente une identité électronique unique du véhicule et qui doit être fournie par les autorités ou par les constructeurs. Cette identité permet d'empêcher tout véhicule de répudier les messages qu'elle a envoyés. En effet, le véhicule est amené à signer ses messages par son propre ELP. Afin de protéger cette identité des attaquants, les auteurs proposent un ensemble de clés anonymes publiques et privées avec un système de cryptage. Pour plus de sécurité, Cette identité peut être stockée dans une entité physiquement séparée du système embarqué sur le véhicule. L'évolution des propositions du groupe de recherche peut être retrouvé dans une série d'articles [15, 16, 17].

Une étude de l'utilisation pratique des pseudonymes pour conserver la confidentialité du conducteur et du véhicule est effectuée dans [57]. Dans cette étude, les auteurs estiment que la latence de communication due à l'utilisation des pseudonymes peut être réduite.

2.5 Les technologies de communication existantes

Malgré la grande évolution des technologies de communication sans fil dans les dernières années, la plupart de ces technologies ne conviennent pas forcément à un réseau Vanet.
Dans ce paragraphe, nous ferons un tour d'horizon des technologies de communication sans fil existantes. Ce tour d'horizon permet de présenter les caractéristiques des technologies et de repérer ce qui est adéquat pour le futur réseau véhiculaire.

Dans le monde des réseaux sans fil, il existe quatre grands groupes :

1. WWAN (Wireless Wide Area Network) : le réseau étendu sans fil est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus. Les principales technologies utilisées sont les suivantes :

   - GSM (Global System for Mobile Communication) : la deuxième génération de téléphonie mobile orientée vers la communication de la voix.

   - GPRS (General Packet Radio Service) : souvent nommé la génération 2.5. Elle constitue une couche au dessous du GSM pour permettre la communication des paquets de données. Le débit théorique maximal est de 171,2 kbit/s mais le débit constaté est toujours inférieur.

[6]Electronic License Plate

– UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) : c'est la norme de la troisième génération de mobiles. La transmission de données peut atteindre théoriquement des débits de transfert de 1,920 Mbit/s.

Ces technologies ne sont pas adaptées à une communication V2V puisqu'elles relient le terminal mobile à une hiérarchie d'infrastructure et ne permettent pas une liaison directe entre les terminaux. La liaison de point à point se fait donc avec un délai qui va jusqu'à quelques secondes. Plusieurs équipes cherchent à combiner ces technologies à grande portée avec des technologies de communication directe[30, 31]. Ces systèmes hybrides ont la possibilité de basculer entre les deux modes infrastructure et Ad Hoc suivant les exigences de la portée et la nature de l'information communiquée.

2. WMAN(Wireless Metropolitan Area Network) ou les réseaux métropolitains sans fil : ces réseaux sont basés sur la norme IEEE 802.16. Le standard de réseau métropolitain sans fil le plus connu est le WiMAX[7], permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70 Mbit/s sur un rayon de plusieurs kilomètres. Cette norme est en cours de test et de commercialisation. Elle offre une alternative aux réseaux câblés entre différents bâtiments et un remplacement aux lignes xDSL.

3. WLAN (Wireless Local Area Network) ou les réseaux locaux sans fil : le réseau local sans fil est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier les terminaux présents dans la zone de couverture. Les caractéristiques sur les exigences du réseau V2V permettent de le positionner dans ce groupe de communication. Il existe plusieurs technologies concurrentes :

   (a) Le Wifi pour WIreless FIdelity est le terme générique pour tout réseau sans fil utilisant le protocole IEEE 802.11. Cette technologie a connu un fort succès dans le domaine de la communication sans fil "indoor". Ce succès est dû en grande partie à la simplicité du standard 802.11 et au soutien des grands groupes industriels. Ce fort succès a imposé le standard Wifi comme une norme internationale pour les réseaux locaux sans fil. Dans le domaine véhiculaire, les propositions de standardisation du réseau V2V convergent vers la version p du 802.11. Pour cette raison, nous consacrerons dans la suite une partie spéciale à cette norme pour décrire son évolution et pour détailler ses aspects techniques.

[7] Worldwide Interoperability for Microwave Access

(b) HiperLAN2 (HIgh PErformance Radio LAN 2.0) est la version 2 de la norme européenne élaborée par l'ETSI[8]. HiperLAN2 permet d'obtenir un débit théorique de 6 à 54 Mbps sur une zone d'une centaine de mètres dans la gamme de fréquence comprise entre 5,15 et 5,3 GHz. Les réseaux HiperLAN2 sont des réseaux orientés connexion. La couche MAC utilise la méthode TDMA[9]. Cette méthode d'accès à répartition de temps permet à cette technologie d'assurer une qualité de service (QoS). Malgré les bonnes performances de cette technologie, elle n'a pas occupé la place qu'elle mérite parce que le marché était déjà saturé par les produits Wifi. Ainsi il n'existe quasiment pas sur le marché des terminaux qui utilisent ce protocole. Toutefois, il existe des travaux de recherche qui visent à étudier la compatibilité de cette norme avec la communication V2V. Dans [32], Aghvami et al jugent Hiperlan2 adéquat pour un schéma de communication V2V sur le plan de la latence et de la robustesse même pour une mobilité à grande vitesse.

(c) UWB (Ultra Wide Band) ou le réseau à très large bande : les techniques UWB sont utilisées depuis le milieu des années 60 par l'armée américaine. Le FCC[10] a approuvé en 2002 son utilisation aux Etats-Unis sans licence dans la bande de 3.1 à 10.6 GHz. Du côté européen, le CEPT[11] recherche toujours une bonne bande de fréquence pour l'allouer. Cette technologie est le fruit d'une coopération entre Freescale, Intel, HP, Nokia et Texas Instrument. L'UWB s'appuie sur le protocole IEEE 802.15. C'est un compétiteur potentiel de la norme IEEE 802.11. Cette technologie utilise des transmissions radio de très courtes durées (souvent de moins d'une nanoseconde). Les largeurs des bandes atteignent au minimum 250 MHz en Europe et 500 MHz aux Etats-Unis d'où le nom de cette technologie. Cette technologie permet des débits allant jusqu'à des centaines de Mbps de communication robuste mais pour seulement quelques dizaines de mètres. Les communications UWB ont montré une bonne immunité aux interférences. A cause de sa large bande de fréquence, la désignation d'une bande de fréquence dédiée est délicate par crainte d'interférence avec les systèmes de communication actuels. L'UWB peut également être utilisé comme un système de positionnement. Les mobiles communiquent alors de proche en proche, les informations de distance sont relevées et leurs positions respectives sont estimées par triangulation. Il est même envisageable d'atteindre des résolutions allant jusqu'à quelques dizaines de centimètres avec cette méthode. Les études d'un système de communication inter-véhicule à base de UWB viennent de

[8]European Telecommunications Standards Institute
[9]Time Division Multiple Access
[10]Federal Communications Commission
[11]La Conférence Européenne des Postes et Télécommunications

commencer. PElbahhar publie en 2005 dans [33] des résultats de tests de plusieurs techniques de modulation de large bande. Il estime que cette technique n'est pas sensible au phénomène de multi-trajets. Il reste à quantifier l'interférence d'un tel système avec les signaux GPS et avec les autres sources de communications. La définition d'un modèle de canal et la caractérisation des chaînes de génération et de communication adéquates sont en cours d'élaboration.

(d) La bande de 60 GHz ou les ondes millimétriques [2, 1] : La bande de fréquence autour des 60GHz a été proposé par le "group of Communication Research Laboratory in Japan" [3]. Cette bande de fréquence autour de 60 GHz a l'avantage d'être une bande assez peu utilisée pour l'instant. De plus, les signaux dans cette bande sont fortement absorbés par l'oxygène atmosphérique de l'ordre de 15 dB par km. Cette caractéristique amortit la portée des ondes à quelques dizaines de mètres ce qui peut être favorable pour réduire les interférences entre plusieurs systèmes utilisant les mêmes bandes de fréquence. En général, les communications à 60 GHz se font en visibilité directe (LOS : Line of Sight) ou bien à partir d'un trajet secondaire après une seule réflexion. Un modèle de propagation inter-véhicule est proposé dans [4].
Le majeur handicap pour un système opérant à 60 GHz est que les matériels opérant à cette fréquence restent pour l'instant assez sophistiqués et par la suite assez chers. Entre les véhicules, une communication de 10 à 100 mètres est envisageable pour une puissance d'émission de 10 mW par exemple. Les deux trajets possibles de communication sont le trajet direct entre les antennes et le trajet réfléchi par la chaussée. L'utilisation de la communication est donc plus adaptée à un modèle où chaque véhicule communique avec les deux véhicules devant et derrière lui comme dans les travaux présentés dans [6]. Cependant, les ondes à 60 GHz sont souvent utilisées avec des antennes directives ce qui les rendent sensibles à l'alignement des véhicules. De fréquentes coupures sont susceptibles de se produire sur les virages ou quand la chaussée n'est pas parfaitement plane. Une étude de ces coupures est faite dans [7].

4. WPAN (Wireless Personal Area Network) ou les réseaux personnels sans fil : ce sont des réseaux d'une faible portée (de l'ordre de quelques mètres). Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ...) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN :

   (a) Bluetooth, lancée par Ericsson en 1994, il propose un débit théorique de 3 Mbps dans sa version 2.0 pour une portée maximale d'une trentaine de mètres.

Bluetooth, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.1, possède l'avantage d'être très peu gourmande en énergie, ce qui le rend particulièrement adaptée à une utilisation au sein de petits périphériques. Des améliorations de la portée et du débit sont attendues avec les nouvelles versions. Il n'existe pas de nombreuses expérimentations de Bluetooth sur véhicules. Parmi les plus intéressante, [22] étudie la faisabilité de la communication V2V en utilisant la technologie Bluetooth. Les résultats des expérimentations montrent que le temps d'établissement de connexion est de l'ordre de 2sec.

(b) HomeRF (pour Home Radio Frequency), lancée en 1998 par le HomeRF Working Group (formé notamment par les constructeurs Compaq, HP, Intel, Siemens, Motorola et Microsoft) propose un débit théorique de 10 Mbps avec une portée d'environ 50 à 100 mètres. La norme HomeRF soutenue notamment par Intel, a été abandonnée en 2003 suite à l'adoption de la norme Wifi dans les processeurs Intel.

(c) La technologie ZigBee (aussi connue sous le nom IEEE 802.15.4) permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour une intégration dans de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, ...). La technologie Zigbee, opérant sur 16 canaux dans la bande de fréquences des 2.4 GHz, permet d'obtenir des débits pouvant atteindre 250 Kb/s avec une portée maximale de 100 mètres environ.

(d) Les liaisons infrarouges : elles permettent de créer des liaisons sans fil de quelques mètres avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Cette technologie est largement utilisée pour la domotique (télécommandes) mais souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses. L'association irDA[12], créée en 1995, a pour but le développement des standards de communication en point à point basés sur l'infrarouge.
Les premières expérimentations des signaux infrarouges débutaient en 1996 avec le JSK[13] au Japon[35]. La communication se fait entre deux véhicules successifs. Le véhicule suiveur possède deux capteurs sur son toit et calcule la distance avec le véhicule devant lui par triangulation. Un autre système est proposé par le projet californien PATH. Ce système permet d'adapter le débit de la communication avec le taux d'erreur. Dans le cadre du projet européen CarTALK, un démonstrateur utilisant la communication infrarouge a été réa-

[12]InfraRed Data Association
[13]Association of Electronic Technology for Automobile Traffic and Driving

lisé [34].

2.5.1 Wifi

Le standard 802.11 a connu un fort succès dans le domaine des réseaux locaux sans fil. Les premiers groupes de travail ont commencé l'élaboration de ce standard au début des années 90. L'approbation finale de l'IEEE a été donnée en septembre 1999. Ce protocole fournit seulement une spécification de la couche physique et de la couche MAC (medium access control) du modèle de couches OSI.

Le prototypage et la production ont commencé après que le WECA[14] a certifié l'interopérabilité des produits 802.11. L'interopérabilité est une notion assez importante pour le déploiement à grande échelle de cette technologie puisqu'elle assure la compatibilité de tous les produits portant le sigle Wifi quelque soit leur marque de fabrication.

Il existe plusieurs variétés du standard 802.11. Cette variété permet de respecter la disponibilité des bandes de fréquence dans chaque zone géographique et apportent des améliorations par rapport à la version initiale. Le tableau 2.1 récapitule les différentes versions de ce protocole.

Donc les deux bandes de fréquence essentiellement utilisées pour la communication en Wifi sont 2.4 et 5.8 GHz. Après avoir étudié la propagation des ondes électromagnétiques dans les deux bandes de fréquence de 2.4 et de 5.9 GHZ, Robert Wilson [29] n'a pas constaté une grande différence. Le pouvoir de pénétration de la plupart des matériaux est pratiquement le même. Une différence de moins de 1dB est constatée entre les deux signaux.

Au niveau de la sécurité des données, le Wifi prévoit dans la couche liaison un système de cryptage appelé WEP[15]. Toutefois, il a été démontré qu'une telle sécurité était facile à contourner. De nouvelles solutions sont désormais recommandées, comme les méthodes Wi-Fi Protected Access (WPA) ou plus récemment WPA2 depuis l'adoption de la norme 802.11i. D'autres méthodes de sécurisation existent avec, par exemple, un serveur Radius chargé de gérer les accès par mot de passe et/ou nom d'utilisateur (802.11x).
Toutefois, les versions a,b et g du protocole sont actuellement les plus répandues. Le tableau 2.2 compare les caractéristiques et les performances de ces trois versions.

[14]The Wirelesss Ethernet Compatibility Alliance
[15]Wired Equivalent Privacy

Standard	Description	Couche
802.11a	5GHz - 54 Mbps	PHY
802.11b	2.4GHz - 11 Mbps	
802.11c	Pontage	
802.11d	Compatibilité internationale	
802.11e	QoS/amélioration de l'efficacité	MAC
802.11f	Itinérance (roaming)	
802.11g	2.4GHz - 54 Mbps	PHY
802.11h	5GHz - rapprochement de l'HyperLAN2	
802.11i	Amélioration de la sécurité	MAC
802.11j	Extension vers 5GHz pour le Japon	
802.11k	Gestion des ressources radio	
802.11m	Maintenance éditoriale	
802.11n	Débit élevé	PHY
802.11r	Roaming rapide	
802.11t	Prédiction des performances	
802.11u	Interaction avec les réseaux non 802	

TAB. 2.1 – Les différentes versions du 802.11

Version	802.11 a	802.11 b	802.11 g
Fréquence(GHz)	5	2.4	2.4
Modulation	OFDM	DSSS, FHSS, PPM	OFDM
Débit maximal (Mbps)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	1, 2, 5.5, 11	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
Région	USA-Japon	Europe	Europe

TAB. 2.2 – Comparaison entre les différentes versions du 802.11

Le matériel Wifi possède l'avantage d'être fonctionnel selon deux modes : infrastructure et ad-hoc. Dans le mode Infrastructure, les ordinateurs sont reliés à un point d'accès. Ce point d'accès est généralement raccordé au réseau filaire et la communication se fait uniquement avec ce point d'accès. Une couverture étendue du réseau sans fil peut se faire en multipliant le nombre de points d'accès. Chaque point d'accès sera alors responsable de centraliser la communication dans une zone géographique. Le "Handover" (ou la gestion de passage entre les champs de communication de deux points d'accès) est aussi assuré si une zone est couverte par plusieurs points d'accès.

Dans le schéma de communication Ad Hoc, les ordinateurs communiquent directement sans aucune infrastructure. Théoriquement, chaque nœud est capable de communiquer avec tout autre nœud dans sa zone de couverture. Dans le cas où ces ordinateurs sont en mouvement, ils forment un Manet[16]. Vue la nature du réseau V2V, c'est le mode Ad Hoc qui nous intéresse pour un schéma de communication directe entre les véhicules.

L'utilisation de la communication V2V a commencé à se concrétiser en décembre 2003 après que la FCC[17] a alloué une bande de 75 Mhz autour de la fréquence 5.9 GHz [28]. Cette bande, "dédiée aux communications à faible portée", est connue sous le nom DSRC (Dedicated Short Range Communication). La communication est rendue donc possible sans licence autour de cette fréquence. Le USDOT[18] et le IEEE ont commencé la standardisation d'une technologie de communication pour l'accès sans fil dans le domaine véhiculaire. Ils ont choisi d'étendre le standard 802.11 et de l'adapter au domaine automobile. Ce projet, connu sous le nom WAVE (pour Wireless Access for Vehicular Environment) [27], est récemment baptisé 802.11p puisque il constitue une version du protocole de communication Wifi. Les grands groupes industriels comme dans le "Vehicle Safety Communication Consortium (VSCC)" et le DSRC Industry Consortium et en partenariat avec "Intelligent Vehicle and Infrastructure Consortium Initiatives" (IC, IVI) du USDOT investissent dans la définition de WAVE pour l'amélioration de la sécurité routière, la gestion de trafic et les applications à usage commercial. Le premier Draft a été rédigé en février 2006. Le groupe de travail (Task group) a demandé récemment d'étendre la date finale de standardisation au 31 décembre 2008 (La figure 2.3 est prise du site internet du groupe de standardisation).

Bien que WAVE (ou le 802.11p) soit basé sur le standard 802.11a, il présente quand même quelques particularités :

- Dans le but de le rendre plus robuste aux trajets multiples, la bande de fréquence du signal est réduite à 10 MHz et la bande de garde entre les différents canaux de communications est doublée. Donc tous les paramètres temporels du signal deviennent

[16]Mobile Ad hoc NETwork
[17]Federal Communications Commission
[18]United State Departement Of Transportation

Re: P802.11p - Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – specific requirements – Part II: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications

Dear Paul:

I am pleased to inform you that on 25 May 2006 the IEEE-SA Standards Board approved the above referenced project until 31 December 2008. A copy of the file can be found on our website at http://standards.ieee.org/board/nes/projects/802-11p.pdf.

FIG. 2.3 – La version finale du 802.11p est prévue fin 2008

deux fois plus longs et l'interférence entre les symboles, causée par les trajets multiples, est aussi réduite.

- L'inconvénient de ces dispositifs est la réduction de moitié le débit de communication.

- Cette réduction de la bande passante réduit la perturbation par effet Doppler puisqu'il s'agit d'une bande de fréquence moins large.

- Afin d'assurer des portées de communication plus importantes, le 802.11p prévoit quatre niveaux de puissance d'émission selon la priorité du message : le niveau 1, à 44 dBm (30 W), correspond à l'arrivée des véhicules d'urgence. Une valeur typique de 33 dBm est réservée pour les applications de sécurité routière.

- Pour la gestion d'accès, plusieurs améliorations du mécanisme de base CSMA/CA sont proposées. Le mécanisme EDCA[19] originalement proposé dans le IEEE 802.11e figure parmi les mieux placés. Ce mécanisme propose une hiérarchisation des délais des files d'attente suivant la priorité des messages.

En attendant le 802.11p, plusieurs équipes de recherche commencent à tester la technologie Wifi sur les véhicules. à notre tour, nous participons à cet effort. Dans le chapitre suivant, nous allons détailler ces tests effectués sur véhicules en comparaison avec nos propres campagnes de mesures. Ces tests ont le but de quantifier les performances de cette technologie de communication mise en application dans des applications coopératives proposées sur le futur réseau V2V.

[19]Enhanced Distributed Channel Access

2.6 Exigence du protocole de communication

Le modèle d'interconnexion en réseau des systèmes ouverts de l'ISO[20] est un modèle de communication entre ordinateurs. Il décrit les fonctionnalités nécessaires à la communication et l'organisation de ces fonctions. Le modèle comporte 7 couches succinctement présentées dans la figure 2.4. Les couches basses (1, 2, 3 et 4) sont nécessaires à l'acheminement des informations entre les extrémités concernées et dépendent du support physique. Les couches hautes (5, 6 et 7) sont responsables du traitement de l'information relative à la gestion des échanges entre systèmes informatiques.

Nous allons présenter dans la suite, un tour d'horizon de l'existant et du compatible dans le domaine de la communication sans fil au niveau des trois couches basses : les couches physiques, de liaison et réseau. En effet, les travaux de recherche se focalisent sur la définition des fonctions principales au niveau de ces trois couches. A travers la présentation de la couche application, nous exposerons une classification des applications et services envisageables avec l'utilisation du V2V.

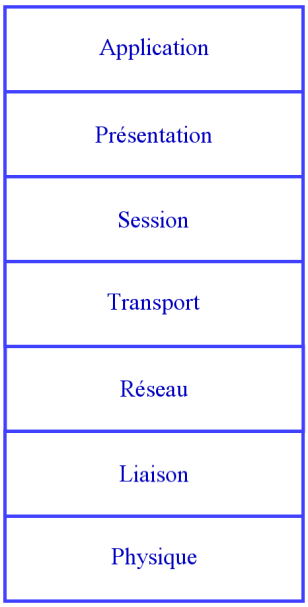

FIG. 2.4 – Les sept couches du modèle OSI

Malgré l'évolution des protocoles de communication qui réclament un modèle plus complet que le ISO, ce modèle reste une référence pour les travaux de conception d'un protocole de communication qui définit la totalité (ou un sous ensemble) de ses couches.

[20] Organisation internationale de normalisation

2.6.1 Couche physique

La couche physique est la première couche du modèle OSI. Elle est chargée de la transmission et la réception des signaux électromagnétiques ou optiques entre les nœuds d'un réseau informatique. Les fonctions essentielles de cette couche sont :

- Le choix du medium de communication : dans le réseau V2V, le canal de communication est le canal hertzien.

- La fréquence de la porteuse : la bande fréquentielle est assez encombrée par des systèmes de télécommunication opérationnels. Parmi les fréquences proposées à l'utilisation en V2V figurent le 2.4 GHz, le 5.8 GHz et le 60 GHz.

- Le choix de la puissance de communication : la puissance du signal influe sur la portée de la communication et de sa robustesse vis a vis du bruit et des interférences. La puissance des signaux est toujours majorée par des valeurs limites jugées non nocives à la santé suivant la bande de fréquence utilisée.

- Les types d'antennes : la directivité de l'antenne est son aptitude à concentrer l'énergie dans une direction donnée pendant les phases d'émission ou de réception. Cette caractéristique, appelée le gain de l'antenne, est exprimée généralement en dBi.
  Dans des réseaux mobiles où les directions entre les terminaux changent constamment, il est plus judicieux d'utiliser des antennes omnidirectionnelles c'est à dire une propagation isotrope autour du véhicule.

  La directivité peut être exploitable dans des configurations avec des directions de communication privilégiées ; comme la communication sélective avec les véhicules devant ou derrière. De nouvelles générations d'antennes (antennes matricielles) à champs de communication orientables peuvent être exploitées dans ce genre d'applications.

- La Modulation ou le choix de la technique de modulation du signal : modulations linéaires-non linéaires, avec ou sans mémoire, avec ou sans étalement de spectre, uni- ou multi-porteuse. Les techniques d'étalement de spectre et la technique de multiplexage fréquentiel.

- Le mode de transmission : Simplex, half duplex ou full duplex.

- La topologie du réseau : le réseau V2V est un réseau ad-hoc.

- La configuration point à point, point à multi-point ou multi-point.

– La commutation entre les canaux.

D'un point de vue pratique, cette couche est toujours réalisée par un circuit électronique spécifique.

2.6.2 Couche liaison

La couche liaison utilise les services offerts par la couche physique. Les fonctions essentielles de cette couche sont :
– La séparation des trames
– Le contrôle des erreurs
– Le contrôle de flux
– La gestion de la liaison
Cette couche est souvent découpée en deux sous-couches :

1. La sous-couche basse dite "Medium Access Control" ou MAC : cette sous-couche sert à la synchronisation des accès au support physique.
2. La sous-couche "Logical Link Control" LLC : cette sous couche sert principalement à la gestion des erreurs.

Dans les réseaux à support partagé comme les réseaux sans fil, la conception d'une couche MAC s'avère plus complexe. Sa fonction principale consiste à gérer le temps de communication entre les différents nœuds dans un réseau sans fil. En d'autres termes, le contrôle d'accès consiste à éviter les collisions entre les diverses communications sur un support partagé. Dans ce paragraphe, nous allons étudier les mécanismes de gestion d'accès multiples qui sont utilisés en communication sans fil. Pour chaque méthode, nous reporterons les résultats de son exploitation dans le réseau V2V.

La figure 2.5 propose une classification des méthodes d'accès selon le medium partagé. Il existe quatre grandes classes :

1. Répartition de l'espace SDMA[21] : l'espace est divisé en plusieurs zones. La communication se fait dans chaque zone d'une manière indépendante et sans interférences. Cette technique constitue l'idée de base du réseau cellulaire utilisée en GSM et en UMTS.
2. Répartition du temps TDMA[22] : le temps de communication est réparti entre les différents nœuds communicants. Cette technique est la plus utilisée dans le domaine du réseau Wlan du fait de sa simplicité. Un avantage du TDMA est qu'il est facile pour un utilisateur de prendre possession de plusieurs tranches du multiplex

[21] Space Division Multiple Access
[22] Time Division Multiple Access

temporel, et il est donc facile d'avoir des utilisateurs avec des débits de données différents.

3. Répartition de fréquences FDMA[23] : Les ressources fréquentielles sont distribuées entre les nœuds. L'avantage de cette méthode est que les différents nœuds peuvent communiquer en même temps.
4. Répartition de codes CDMA[24] : le CDMA est basé sur la technique du spectre étalé. Chaque utilisateur se voit allouer un code PN (code aléatoire) différent, et est identifié par ce code. Les deux avantages du CDMA sont l'absence de planning de fréquence et la facilité de mélanger des canaux voix et données.

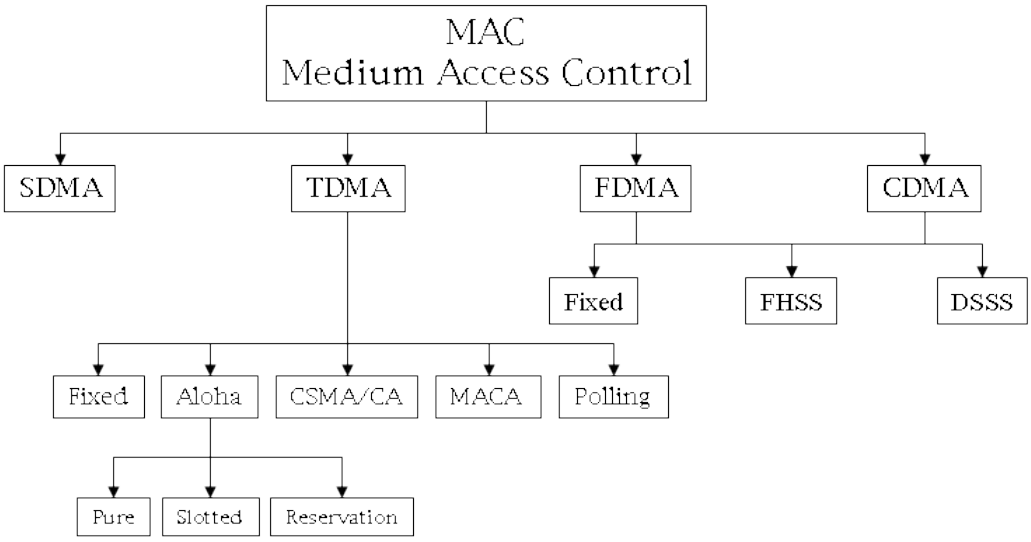

FIG. 2.5 – Les méthodes de gestion d'accès au canal de transmission dans les réseaux sans fil

D'autre part, l'allocation de ces ressources peut se faire d'une manière fixe ou aléatoire, ce qui conduit à la classification suivante :

- Méthodes d'accès fixes : généralement utilisées pour les réseaux orientés voix. Dans ces techniques, au moment de l'établissement de la connexion, des ressources radio sont allouées à la connexion et ne varient plus en cours de connexion.
- Méthodes d'accès aléatoires : destinées en général pour les réseaux orientés données. En utilisant ces méthodes, il n'y a pas besoin de réserver une ressource particulière

[23]Frequency Division Multiple Access
[24]Code Division Multiple Access

pour chaque membre du réseau. Il suffit donc d'éviter ou de détecter la situation où deux machines essaient de communiquer en même temps. Le cas échéant, aucun des paquets ne peut être reçu correctement.

Parmi les techniques étudiées dans un réseau V2V, nous détaillons les mécanismes qui ont été proposés pour les réseaux Vanets.

2.6.2.1 ALOHA

Le protocole ALOHA original est dénommé d'après le système ALOHA développé par N. Abramson et ses collègues de l'université d'Hawaï en 1971 [39]. Ce système reliait différents sites de l'île par des stations UHF et une communication par paquets entre ces stations. Le protocole utilisé fut baptisé ALOHA, ce qui veut dire "hello" en Hawaïen.

ALOHA est un mécanisme de gestion d'accès à répartition de temps avec une gestion de conflit et où la demande d'accès est aléatoire. Le principe de base de ALOHA est extrêmement simple. Le terminal dit "hello" à travers son interface avec le canal de communication quand un paquet arrive. Chaque paquet est flanqué d'un code détecteur d'erreur. Quand la station de base reçoit un paquet, elle vérifie le code et, s'il est correct, envoie un accusé de réception au mobile. Si plusieurs paquets se recouvrent dans le temps, il y a collision, et le mobile renvoie le paquet après un temps aléatoire pour éviter les collisions répétées.

L'avantage principal est la simplicité du protocole, puisqu'il ne faut pas de synchronisation entre mobiles, ni entre le mobile et la station de base. L'inconvénient est que la probabilité de collision est importante et que le débit effectif maximal de l'ALOHA pur est de 18% du débit offert par l'interface air.

Le débit effectif offert par ALOHA pur représente un gaspillage important de la bande passante, de ce fait ALOHA est le plus souvent utilisé dans sa version "synchronisée", appelée "slotted ALOHA". Dans cette version, le temps est divisé en slots et l'émetteur ne peut émettre qu'au début d'un slot. Ceci évite donc les collisions partielles. En plus, si nous prévoyons des paquets avec la longueur d'un slot, nous obtenons des collisions complètes ou pas de collision du tout. Cette technique double le débit effectif qui monte donc à 36% du débit de transmission. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite une synchronisation des systèmes communicants.

Une autre version est le R-ALOHA (pour Reservation ALOHA), les trames sont divisées en périodes de contention et périodes sans contention. Pendant la période de contention, le mobile utilise des paquets très courts pour effectuer la réservation d'un slot de temps. Si la réservation est couronnée de succès, le mobile peut alors utiliser une trame

pendant la période sans contention. Cette méthode a été proposée pour la communication V2V dans [41]. Une analyse de performance de cette méthode pour des applications temps réel est faite dans [40]. La probabilité d'échec dans le pire cas est le paramètre utilisé pour quantifier cette performance. Dans son article sur le R-ALOHA dans la bande de 60 GHz, Verdone [42] étudie l'impact du modèle de propagation à cette fréquence sur la performance de la communication avec le mécanisme R-ALOHA comme mécanisme de gestion d'accès. L'un des problèmes de ce mécanisme est son instabilité dans le cas d'une grande fréquence de participation et de demande de réservation.
Un nouvelle version appelée RR-ALOHA (pour Reliable R-ALOHA) est développée par Borgonovo et al dans [43] pour améliorer l'efficacité et la robustesse du mécanisme. Ces mécanismes sont parfois utilisés pour la réservation dynamique d'un slot de temps dans d'autres méthodes de partage d'accès.

2.6.2.2 Carrier Sensing Multiple Access/Collision Avoidance

Dans ALOHA, les utilisateurs ne tiennent pas compte de l'activité de leurs congénères et il n'y a pas de mécanisme pour éviter les collisions. Une méthode simple pour éviter les collisions consiste simplement à écouter le canal avant de transmettre un paquet. Si le canal est utilisé, le terminal attendra avant d'émettre. Les protocoles qui utilisent ce principe sont appelés CSMA (Carrier Sense Multiple Access) ou LBT (Listen Before Talk).

Cette méthode est utilisée dans les réseaux Ethernet avec la variété CSMA/CD (pour Collision Detection). Dans cette méthode, les systèmes informatiques émetteurs sont capables de détecter directement une collision sur le bus puisque ils disposent de la possibilité d'émettre et d'écouter le canal en même temps. Il existe plusieurs variétés de cette technique :

- non-persistent CSMA : consiste à attendre un temps aléatoire en cas de collision avant de ré-ecouter le canal.

- 1-persitent CSMA : consiste à continuer à écouter le canal et à émettre immédiatement le paquet quand le canal se libère.

- p-persistent CSMA : consiste à continuer à écouter le canal et à émettre le paquet avec une probabilité p.

Cette double capacité n'est pas disponible dans les systèmes de communications sans fil. Et même si elle existe, elle ne sera pas efficace parce que la collision peut avoir lieu dans la zone de réception où les émetteurs réciproques ne sont pas dans le champ de communication mutuelle. Pour ces raisons, la procédure de détection de collision est remplacée par le mécanisme d'évitement de collision dont nous exposons le principe dans la suite.

Le mécanisme d'évitement de collision repose sur l'idée d'ajouter des périodes de pause sur le canal. Lorsqu'une machine finit de communiquer, elle se contente d'écouter le canal pendant un temps IFS[25]. Pendant ce temps, les machines en attente sur le canal, vont tenter de communiquer après une certaine pause. La première machine à occuper le canal commence donc à émettre. Pour s'assurer de la bonne réception des données, la machine en réception (si le mode est unicast) renvoie un accusé de réception. En absence de cet accusé, la machine tentera de re-communiquer la même trame.

Ce mécanisme ne garantit absolument pas une absence de collision mais il propose une gestion simple de ces collisions.

Un mécanisme optionnel de Handshaking CTS/RTS peut être utilisé pour résoudre le problème de nœud caché (ou hidden node) dans un mode unicast. Le mécanisme de RTS/CTS consiste à ce que le nœud émetteur commence son émission par une demande d'émission (Request To Send) en spécifiant le nœud récepteur et la durée de la communication. Ainsi le nœud récepteur déclare dans son entourage qu'il réserve le canal pour une durée définie. La communication ne peut donc commencer qu'après un accord donné par le récepteur (Clear To Send). Le problème apparaît lorsqu'un nœud (1) est dans le champ de communication du récepteur (2) et pas dans celui de l'émetteur(3). Dans ce cas, les mécanismes de détection de collision ne sont pas efficaces puisque (1) et (3) ne sont pas dans le même domaine de communication. Par la suite, (2) peut subir des communications simultanées des deux autres nœuds comme illustré sur la figure 2.6.

L'utilisation du CSMA est proposée dans [44] dans une application de relayage d'informations d'accidents. Les paramètres du protocole MAC sont adaptés à ce type de réseau en proposant par exemple de moduler le temps d'attente avant l'émission selon la vitesse du véhicule émetteur. Une approche similaire est proposée dans [45].

Le protocole DOLPHIN[26], utilisé dans la démo 2000 explicité dans [36], a adopté le CSMA dans la couche MAC pour des communications inter-véhiculaires. Une étude de la performance de cette méthode d'accès dans la bande de fréquence de 5.8 GHz est faite dans [37, 38].

Dans [46], Shiba et al comparent les performances des méthodes d'accès sur un simulateur. La figure 2.7, présentée dans ce papier, donne le taux d'erreur en fonction de la densité des véhicules. Cette figure montre que le p-persistent CSMA est la meilleure solution dans le cas d'une forte densité de véhicules.

[25]Inter Frame Space

[26]Dedicated Omni-purpose inter-vehicle communication Linkage Protocol for HIghway automatioN

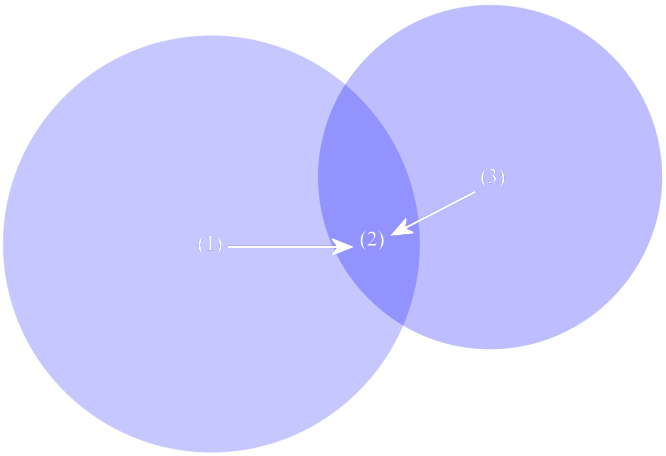

FIG. 2.6 – Le problème de nœud caché

L'un des inconvénients de ce mécanisme est le manque de QoS au niveau de cette sous-couche. Un autre inconvénient est que ce mécanisme met en concurrence les nœuds adjacents, ce qui ne sera pas favorables à un schéma de communication multi-hop où chaque nœud joue le rôle d'un relais pour acheminer plus loin les données. Plusieurs améliorations de ce mécanisme sont proposées dans [47] pour corriger ces défauts.

2.6.2.3 Wireless Token Ring Protocol

Le WTRP est une adaptation sans fil du mécanisme de jeton utilisé en IEEE 802.4.

Le jeton matérialise le droit de transmettre. Chaque station le passe (le répète) sur l'anneau, à la station qui lui a été prédéfinie comme station suivante. Une station désirant transmettre garde ce jeton pendant le temps nécessaire à transmettre une trame, puis envoie le jeton à la suite de cette trame pour indiquer que la voie est libre. Si une station tombe en panne, une interaction se fait afin de bloquer l'accès au jeton pour la station qui est en panne. Le WTRP inclut des mécanismes de construction, recouvrement, ajout et départ d'un nœud.

Ce mécanisme a été proposé par Lee et al [48] dans le projet californien PATH pour l'utilisation dans la communication V2V. Les véhicules forment ainsi une groupe (ou anneau) de conduite coopérative.
Théoriquement, cette méthode garantit une QoS dans le groupe de communication en assurant une bande passante à chaque véhicule et en estimant une latence de communication. Mais pratiquement dans des applications de conduite coopérative, les groupes

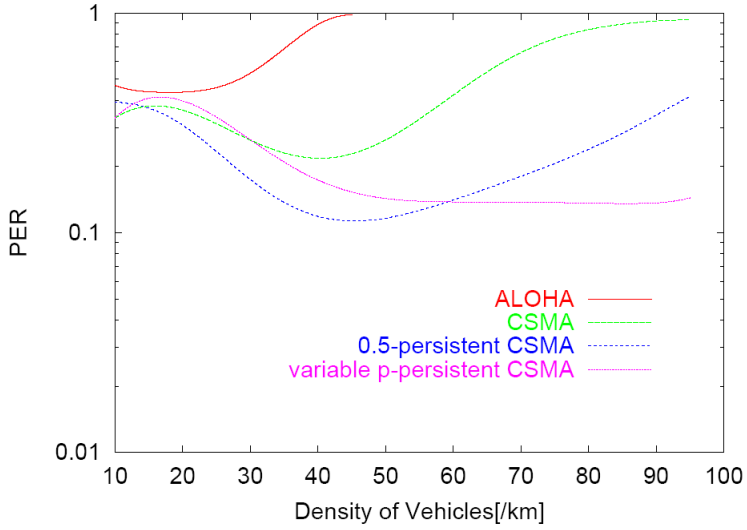

FIG. 2.7 – Le taux d'erreur en fonction de la densité des véhicules par Km

de communication changent fréquemment et la topologie des anneaux changent aussi. Ce dynamisme limite l'efficacité de ce genre de mécanisme dans les réseaux Vanets.

La même équipe de recherche compare dans [49] les performances du WTRP et du 802.11. Elle montre la rapidité du WTRP à se récupérer après une défaillance du système. En plus, le mécanisme à jeton offre un plus grand débit réparti équitablement entre les nœuds du réseau. Pour toutes ces raisons associées à la prédiction d'une latence de communication, ces chercheurs proposent le WTRP pour les applications temps réel.

Toutefois, ce mécanisme a besoin d'une implémentation réelle pour mesurer ses performances parce que l'implémentation actuelle se situe au dessus d'une architecture 802.11. Mais ce protocole reste un protocole intéressant à tester et à implémenter pour valider ses performances dans des situations de mobilité.

D'autres mécanismes de gestion de l'accès existent comme le UTRA-TDD[27] qui était adopté par le projet Fleetnet [50].

Xu et al propose un mécanisme de broadcast basé sur la position des véhicules (Location Based Broadcast Communication) [51] : chaque véhicule transmet des messages avec une fréquence constante. La probabilité de transmission optimale au niveau MAC est évaluée pour réduire l'encombrement du canal et la probabilité de collision.

HIPERLAN 1 [52], Black Burst [53], et le Enhanced Distributed Coordination Function (EDCF) de IEEE 802.11e [56] sont tous conçus avec une notion de QoS. Mais HIPERLAN

[27] UMTS Terrestrial Radio Access with Time Division Multiplexing

1 et Black Burst ne possèdent pas de mécanismes contre le problème des nœuds cachés. Quant à l'EDCF, il souffre d'un grand nombre de conflits dans le cas où la probabilité du message à priorité égale devient grande.

De ce qui précède, nous avons constaté que le nouveau réseau véhiculaire aura besoin d'un nouveau mécanisme de gestion d'accès au moyen de communication. Ce mécanisme doit :

- être adapté au dynamisme du réseau V2V
- assurer une borne maximale de la latence ou bien estimer la latence produite au niveau de l'accès au canal
- résoudre les problèmes dus à la communication sans fil en l'occurrence le problème du nœud caché

2.6.3 Couche réseau

La fonction de routage est la fonction la plus importante de la couche réseau. Le routage (ou acheminement) consiste à déterminer un chemin de transport des données entre une source et une destination. Dans cette section, nous nous limitons à l'étude des algorithmes de routage pour les réseaux mobiles et qui sont susceptibles de bien servir au réseau Vanet. Il est clair qu'avec les réseaux à dynamique variable ou fortement variable, la tâche des algorithmes de routage devient plus complexe parce que la création des bouts de réseaux stables et capables d'acheminer les données devient moins évidente.

En supposant résolu le problème de collision entre les paquets communiqués, le schéma le plus simple consiste à ce que chaque véhicule broadcast ses données et tous les véhicules qui sont à l'écoute dans le périmètre de communication du véhicule reçoivent le message. Dans ce cas, la communication sera limitée à la portée de l'outil de transmission utilisé. Pour étendre le périmètre de transmission de l'information, Il doit y avoir un système de relayage qui consiste à transformer les nœuds réceptifs de l'information en des nœuds relais qui re-émettent à leur tour le même message.
Par contre, l'utilisation intuitive de cette méthode peut conduire à des blocages suite à une "tempête d'inondation" (selon le terme employé par [23]) suite à de multiples collisions et redondances.
D'autre part, dans un canal de communication à bande passante non infini, il faut chercher à optimiser le temps d'occupation du canal et adresser l'information seulement aux autres nœuds qui y sont intéressés. Ce ciblage ou adressage de l'information n'est possible qu'à partir d'un système de routage efficace.

En vue du grand nombre des algorithmes de routage pour les réseaux ad-hoc, nous présentons dans la suite des classifications de ceux-ci selon différentes facettes.

2.6.3.1 Proactif / Reactif

Cette classification classique permet de distinguer deux approches du temps de calcul des chemins de routage. Dans l'approche proactive (appelé aussi source-initiated), chaque nœud maintient une table de routage sur le réseau. Cette classe d'algorithmes nécessite un échange périodique entre les différents nœuds de manière à maintenir à jour les tables de routage. Tandis que dans les protocoles réactifs (ou on-demand driven), le chemin n'est calculé que sur demande. Le chemin entre deux nœuds est donc calculé au moment de demande d'acheminement de données entre ces deux nœuds. Le calcul des routes est donc divisé en deux étapes : la découverte de nouveau trajet sur demande d'acheminement des données à une destination et la maintenance des routes existantes dans le cas de changement de la topologie du réseau.
Nous remarquons que les algorithmes proactifs sont plus adaptés à des réseaux lentement variables non fortement contraints au niveau de la bande passante pour pouvoir assurer des échanges périodiques entre les nœuds. En plus, les approches proactives ne sont pas adaptées pour supporter une scalabilité[28] ou extensibilité du réseau. Tandis que les algorithmes réactifs sont adaptés aux réseaux qui subissent de forts changements et où le calcul préalable des chemins ne permet pas de gagner beaucoup de temps. Par contre, les algorithmes réactifs introduisent un délai supplémentaire entre la source et le destinataire, ce délai correspond à la phase de recherche de routes entre les deux nœuds. Il existe des approches hybrides qui combinent les deux idées. Elles agissent en mode proactif pour découvrir le proche voisin. Mais pour le reste du réseau, ce protocole hybride agit en mode réactif. Ce genre de technique est adapté aux grands réseaux.

2.6.3.2 Uniforme / Non-uniforme

Dans un réseau à structure uniforme, tous les nœuds adressent les algorithmes de routage de la même manière. Cependant, dans les algorithmes non uniformes, nous cherchons à classer les différents nœuds par ordre de proximité et le traitement des nœuds dans le protocole de routage dépend de cette notion de proximité.

2.6.3.3 Unicast / Multicast

En mode unicast, les algorithmes de routage construisent un chemin entre chaque paire de nœuds. Chaque nœud aura donc la possibilité de s'adresser à une seule destination à la fois. La faiblesse de cette méthode est lorsque le message doit être envoyé à une multitude de destinations. Les algorithmes unicast permettent de construire une arbre de hiérarchie d'une source à un ensemble de nœuds. Une déclinaison intéressante est le Geocast[29] qui

[28] le terme de scalability en anglais indique la capacité d'un système, ou de ses composants, à être utilisé sur des plates-formes de tailles très inférieures ou très supérieures

[29] Geographic cast

organise ces arbres de connectivités suivant des positions géographiques. Les algorithmes geocast sont intéressants de plus que les systèmes GPS se démocratisent dans les véhicules et que l'information de positionnement influe beaucoup sur la nature de l'information à communiquer.

2.6.3.4 Mono-canal / Multi-canal

Dans les systèmes monocanaux, les différents nœuds se partagent les mêmes ressources, le système de routage doit se baser sur une couche de liaison efficace. La plupart du temps cette couche est orientée CSMA[30]. Tandis que dans le cas où les canaux sont multiples, la couche réseau aura comme fonction à la fois d'acheminer les données et de gérer le partage des ressources. Dans le cas du réseau véhiculaire, les véhicules partagent le canal hertzien avec les mêmes plages fréquentielles. Ce qui fait que le réseau est plutôt un réseau mono-canal et le partage de ce canal est confié en général à des algorithmes de gestion de collisions.

Il existe plusieurs critères quantitatifs de mesure de l'efficacité de routage. En s'appuyant sur l'étude effectuée dans [24], nous en citons les plus importants :

- Le temps de constitution du réseau : le temps nécessaire au réseau pour arriver à une stabilité qui lui permet de communiquer avec succès son premier message.
- Le temps d'intégration du réseau : le temps nécessaire pour un nouveau nœud entrant pour intégrer un réseau Ad Hoc déjà existant.
- Le temps de retrait du réseau : le temps nécessaire pour un réseau ad-Hoc pour reconnaître la perte d'une ou de plusieurs nœuds et de gérer cette perte.
- Le temps de récupération du réseau : le temps nécessaire au réseau pour se récupérer après une perturbation de son état général.
- La fréquence de rafraîchissement : c'est le nombre de paquet de contrôle ou les octets d'entêtes communiqués pour établir les opérations des fonctions du réseau.
- L'espace de mémoire : l'espace de mémoire nécessaire au sauvegarde des tables de routage.
- Le degré de scalabilité du réseau : le nombre de nœuds que l'algorithme est capable de gérer tout en préservant la communication.

Comment les réseaux Vanets influencent-ils les algorithmes de routage ou bien quelles sont les exigences de ce nouveau type de réseau en terme d'acheminement des données par rapport à d'autres réseaux mobiles ?
Les points suivants essayent de répondre à cette question :

- La vitesse relative entre les différents nœuds est de valeur importante. Cette vitesse relative, en association avec les différentes possibilités de trajectoires, fait que les

[30] Collision Detection Multiple Access

réseaux de type Vanets subissent un changement instantané de topologie. Ce changement de topologie influe directement sur les chemins de routage. Nous distinguons donc trois cas typiques :

1. L'introduction d'un nouveau nœud dans le réseau c'est à dire la création de nouveaux chemins pour les données.
2. La perte d'un nœud du réseau ou la perte d'un ensemble de chemins de données.
3. La dislocation du réseau en un ensemble de sous réseaux.

- La simple restructuration des positions relatives des nœuds oblige une restructuration des chemins de routage dans le cas d'une perte (ou respectivement l'établissement) de connexion directe entre les nœuds du réseau. Si l'algorithme de routage cherche à établir des chemins optimaux entre les nœuds, ce changement de topologie à l'intérieur de réseau contraint la mise à jour des poids de chaque chemin et par la suite un changement de la priorité des chemins. Le changement de topologie du réseau amène assez souvent à des coupures de liaisons entre les différents nœuds. Nous parlons donc d'un réseau à faible diamètre effectif. Ces coupures de connexion conduisent parfois à un phénomène de fragmentation du réseau en des sous-réseaux. Les algorithmes de routage doivent traiter de telles fragmentations en assurant une restructuration complète des chemins de connectivité.

- Selon le rayon de couverture de la communication et la densité du trafic, un réseau Vanet n'assure pas en général une multitude de chemins de connexion entre deux nœuds. En effet, plusieurs chemins de connexion alternatives sont bien utiles pour pouvoir maintenir une connectivité plus robuste et par la suite de maintenir un débit de communication plus important. En plus, les chemins multiples peuvent jouer un rôle positif dans le domaine de la sécurité et de l'authenticité de la communication.

- Le mouvement des nœuds dans le domaine automobile n'est pas totalement libre. En effet, ce mouvement est contraint par des parcours prédéterminés et des trajectoires limitées par les routes. Cette caractéristique influe sur l'acheminement des données puisque les trajectoires des nœuds deviennent par la suite prévisibles. La prédiction des chemins peut être utilisée par les algorithmes de routage pour prédire les prochaines routes d'acheminements de données.

- Avec les trajectoires organisées et définies des véhicules, le réseau acquiert deux nouvelles notions importantes que sont le sens des déplacements (sur la même voie ou bien sur la voie opposée) et la position relative (devant ou derrière le véhicule dans le sens de déplacement). Ces nouveaux repères permettent d'optimiser les algorithmes de routage des données selon l'application visée puisqu'en général la nature des données communiquées est bien différente pour chacune des catégories déjà citées.

Dans la suite nous présentons un récapitulatif des principaux algorithmes de routage :

- L'algorithme de routage AODV (Ad hoc On Demand Vector) est un protocole de routage destiné aux réseaux dit "mobiles". AODV est capable à la fois de routages unicast et multicast. ODV est un protocole de routage pour réseau maillé fonctionnant sur la base d'un routage réactif : une demande de création de route est envoyée à toutes les machines à portée hertzienne (la phase d'inondation). Ces routes sont créées de proche en proche sur chaque relais mais uniquement pour une durée limitée. Un vote final aura ensuite lieu pour déterminer quelle est la meilleure route que le nœud émetteur va utiliser et que les relais vont maintenir sur une courte durée.

- DSR (Dynamic Source Routing) : c'est un protocole réactif. Ici, le chemin à parcourir par le paquet est inclus dans l'entête du paquet. Le routage s'effectue de nœud en nœud en consultant cet entête. Le DSR est composé de deux mécanismes : la recherche de route à la demande et la maintenance de ces routes.

- OLSR (Optimized Link State Routing) : c'est un protocole proactif. Dans un réseau à états de liens, chaque nœud déclare ses liens directs avec ses voisins à tout le réseau. Dans le cas OLSR, les nœuds ne déclarent qu'une sous partie de leur voisinage. Il offre des routes optimales en termes de nombre de sauts dans le réseau. La table de routage est construite au niveau de tous les sauts et le routage des données s'effectue saut par saut sans l'intervention d'OLSR dont son rôle s'arrête à la mise à jour de la table de routage au niveau IP.

- FSR (Fisheye State Routing) : protocole proactif à état de lien c'est à dire qu'il distingue les détails au centre et la précision se dégrade en s'éloignant de ce centre. FSR utilise cette technique pour garder des informations précises sur le voisinage proche du nœud et la qualité se dégrade avec la distance par rapport au point. Ainsi, la fréquence de rafraîchissement diminue avec la distance.

- ZRP (Zone Routing Protocol) : c'est un protocole hybride. Chaque nœud utilise un des algorithmes proactifs dans son voisinage. Un deuxième algorithme réactif opère en dehors de cette zone pour chercher une route vers une destination. Selon le type des algorithmes proactifs et réactifs utilisés, nous obtenons différentes versions de ce protocole.

- CBRP (Cluster Based Routing Protocol) : c'est un protocole hybride. Contrairement au cas des ZRP où chaque nœud constitue sa propre zone, nous divisons ici le réseau en zones ou clusters avec un chef élu de la zone. A l'intérieur d'un cluster, nous

utilisons un protocole proactif. La recherche de route se fait donc d'une manière réactive entre ces chefs de clusters.

2.6.4 Couche application

C'est la couche initiatrice de ce domaine de recherche. C'est à partir d'un besoin de services particuliers que les travaux de recherche ont commencé à exploré la piste de la coopération entre les véhicules. La couche application est la couche qui a fait l'objet de beaucoup de propositions et d'échanges. Pour la définition d'applications réalistes, il faut prendre en compte les performances des outils de communications, le taux de véhicules équipés par ces outils, le degré d'acceptation de ces services et finalement l'ergonomie de l'interface qui est censé présenter le résultat au conducteur. Au niveau applicatif, nous pouvons distinguer trois grands types de domaines où la communication peut apporter un plus :

1. La sécurité routière : la diminution du nombre de personnes blessées et tuées sur les routes étaient l'une des premières motivations pour l'utilisation de la coopération et de la communication dans le domaine véhiculaire. Cette catégorie contient tous les services qui utilisent les informations partagées entre les véhicules dans le but de réduire le risque et anticiper les chocs. Les contraintes dans ce type de services sont la latence et l'exactitude des données, la communication V2V peut s'avérer bien adéquate à ce genre de services. Comme décrit précédemment, la communication constitue une source d'informations alternatives qui permet d'enrichir les informations du conducteur sur son environnement et par la suite de lui donner la possibilité et le temps de réagir plus efficacement. Le travail effectué durant la thèse est concentré sur cette catégorie d'applications. Le but de cette thèse est la mesure de l'apport de la communication entre les véhicules pour la réduction du risque de collision. Nous allons ainsi proposer dans les chapitres suivants des services et applications à base de communication. Ces services tentent de proposer des solutions à des situations particulières de conduite dans lesquelles les ADAS traditionnels ne fournissent pas des solutions satisfaisantes. A titre d'exemple, nous pouvons citer la gestion de risque à l'approche d'une intersection où la communication peut s'avérer un moyen pour compenser l'occlusion, la gestion de l'insertion et du dépassement, l'optimisation des interdistances, le Stop & Go coopérative, l'alerte post-crash ou le e-call, etc.
2. La gestion du trafic : le véhicule est la source crédible d'informations sur le trafic. Cette idée constitue l'axe principale des deux projets REACT [26] et Com2REACT [25]. Avec la communication V2V, le véhicule se transforme en un capteur de trafic. La communication véhicule à véhicule permet de propager ses informations sur l'état du trafic. Le réseau véhiculaire peut donc coopérer de proche en proche pour optimiser le trafic et prévenir la congestion. Ils existent cependant d'autres applications

qui utilisent la communication pour fluidifier le trafic, citons à titre d'exemple : la coopération directe entre les véhicules pour gérer le passage des véhicules d'urgence.

3. Les applications de confort : cette catégorie comporte toutes les applications qui sont bénéfiques au conducteur et qui ne relèvent pas de la gestion du trafic ni de la gestion de risque. Ces applications se présentent donc en tant que services fournis au conducteur. Tout de même, ces offres sont susceptibles d'être les services les plus attractives pour les utilisateurs.
   Parmi ces applications citons les panneaux d'annonces locales : d'ordres commerciales comme les offres de restaurants, la présence de stations service à proximité, ou culturels comme des informations sur la commune (ou la ville) pénétrée. Nous pouvons imaginer encore d'autres services télématiques de confort comme le péage à distance sur autoroute, le paiement automatique ou à distance dans les stations de service (surtout pour les handicapés). Il existe une autre catégorie de services qui consiste à remplacer les procédures traditionnelles de vérification des permis de conduire et le contrôle technique à distance par des procédures électroniques plus souples et plus efficaces.
   L'une des finalités de cette catégorie est l'association de la communication véhicule à véhicule pour étendre l'offre de connexion à internet sur les véhicules. A toutes ces nouvelles applications s'ajoutent les communications point à point entre deux véhicules qui voyagent ensemble par exemple pour garder un suivi entre elles, pour échanger des messages de types chating, pour partager des données et des chansons, pour assurer guidage partagé, ou bien pour donner aux enfants dans les deux véhicules la possibilité de jouer en réseau.

A noter quand-même à la fin de ce paragraphe qu'il est bien possible d'imaginer de multiples applications à base de la communication V2V. Cependant, un cahier de charges non-réaliste peut handicaper le développement de ce concept dans le domaine des véhicules comme expliqué par Fussler [54] dans le cadre du projet Fleetnet.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un tour d'horizon du domaine de la communication V2V. Nous avons essayé de couvrir tous les thèmes annexés à ce thème de recherche : au niveau technique comme au niveau socio-économique.

Le but de cette étude est d'investiguer le disponible et l'adéquat dans le domaine des communications Ad hoc sans fil et qui est susceptible d'être utile dans un prochain et probable réseau véhiculaire V2V.

La technologie Wifi est fortement proposée comme une solution pour la communication V2V. Cependant, cette technologie nécessite beaucoup de modifications pour prendre en compte les exigences du nouveau réseau véhiculaire. La sécurité des données et la fiabilité du réseau sont les deux thèmes majeurs qui préoccupent pour l'instant la recherche dans ces différentes branches.

Au niveau applicatif, les propositions sont abondantes. Le plus important dans la prochaine étape est de définir un cahier des charges clair et réaliste pour valider le concept et mettre en première ligne les services "utiles" et "réalistes". Par "utile", nous entendons que ces applications doivent apporter un plus pour l'utilisateur final en rendant la conduite plus sûre, plus efficace et plus confortable. Par "réaliste", nous voulons favoriser le classement des applications en hiérarchie temporelle qui prend en compte les exigences technologiques, le taux d'équipement des véhicules et le degré d'acceptation des conducteurs de ces nouveaux services.

En attendant la concrétisation d'un standard pour les réseaux Vanet, nous allons anticiper sa définition en proposant des services intelligents sur les véhicules et en mesurant les exigences de ces applications en matière de ressources et de contraintes. Pour proposer ces services, nous allons adopter des technologies existantes et les adapter à notre contexte.

Notre approche permet ainsi de commencer la conception de nouveaux services coopératifs et en même temps de participer à la définition du prochain standard de communication en évaluant les performances exigées des outils de communication.

Nos propositions de nouveaux services coopératifs sont faites sur deux niveaux : un premier niveau de conception de services et un deuxième niveau de test sur notre flotte de véhicules.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre flotte de véhicules intelligents. Nous allons encore présenter notre choix de matériels et logiciels de communication.
La deuxième partie du chapitre suivant sera consacrée à la mesure de performance et la caractérisation de notre système de communication.

Bibliographie

[1] Fischer, H.-J., "Digital beacon vehicle communications at 61 GHz for interactivedynamic traffic management", Telefunken Systemtechnik GmbH, Berlin ; Automotive Electronics LONDON, 28-31 Oct 1991,On page(s) : 120-124

[2] Shiraki, Y. Ohyama, T. Nakabayashi, S. Tokuda, K. Kato, A. Fujise, M. Horimatsu, T., "Experimental system of 60 GHz millimeter wave band inter-vehicle communications based CSMA method" Wireless Technol. R&D Dept., Oki Electr. Ind. Co. Ltd., Kanagawa, Japan ; Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE, Publication Date : 17-21 June 2002, Volume : 2, On page(s) : 576- 582 vol.2

[3] A. Kato, "Propagation Characteristics of 60 GHz Millimeter Wave for ITS Inter-Vehicle Communications (1) - Outline of Research and Experimental Activity at YRP" , Technical Digest ofthe 1st Workshop on ITS Telecommunications, pp.251-256 (2000).

[4] Schafer, W.,"Channel modelling of short-range radio links at 60 GHz for mobile intervehicle communication" DLR German Aerosp. Res. Establ., Inst. for Commun. Technol., Oberpfaffenhofen ; 41st IEEE Vehicular Technology Conference, 1991, St. Louis, MO, USA. On page(s) : 314-319

[5] A. Kato, K. Sato, M. Fujise, and S. Kawakami, "Propagation characteristics of 60-GHz millimeter waves for ITS inter-vehicle communications" IEICE Transactions on Communications, vol. E84-B, no. 9, pp. 2530-2539, 2001.

[6] Brown, A.C. Cullen, E.J. Wu, J. Brackstone, M. Gunton, D.J. McDonald, M., "Vehicle to vehicle communication outage and its impact on convoydriving" Div. of Commun. Inf. Syst., BAE Syst. Adv. Technol. Centres, Chelmsford ; IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000, Dearborn, MI, USA. On page(s) : 528-533

[7] Takahashi, S. Kato, A. Sato, K. Fujise, M., "Distance dependence of path loss for millimeter wave inter-vehicle communications" Commun. Res. Lab., Yokosuka, Japan ; IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003. Volume : 1, On page(s) : 26- 30 Vol.1

[8] Blum, J. Azim Eskandarian, "The threat of intelligent collisions"', Center for Intelligent Systems, George Washington Univ., DC, USA, IT Professional, Jan.-Feb. 2004, Volume : 6 , Issue : 1, On page(s) : 24 - 29

[9] B. Parno and A. Perrig, "Challenges in securing vehicular networks", Proceedings of the Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-IV), 2005.

[10] Gerlach, M. Steglich, S. Arbanowski, S. Wegdam, M. Teunissen, H., "Trustworthy applications for Vehicular Environments" Vehicular Technology Magazine, IEEE 2006, Volume : 1 , Issue : 2, On page(s) : 9 - 15

[11] L. Huang, K. Sampigethaya, K. Matsuura, R. Poovendran, K. Sezaki, and M.L. Caravan, "Providing location privacy for vanet" In Proceedings of Escar 2005.

[12] A.R. Beresford and F. Stajano, "Location privacy in pervasive computing", IEEE Pervasive Computing, pp. 46-55, 2003.

[13] J.-P. Hubaux, S. Capkun and J. Luo, "The security and privacy of smart vehicles", IEEE Security and Privacy Magazine 2(3) (2004), 49-55.

[14] M. E. Zarki, S. Mehrotra, G. Tsudik, and N. Venkatasubramanian, "Security issues in a future vehicular network" in European Wireless, 2002.

[15] Maxim Raya and Jean-Pierre Hubaux, "Securing Vehicular Ad Hoc Networks", Journal of Computer Security, Special Issue on Security of Ad Hoc and Sensor Networks, Vol. 15, Nr. 1, pp. 39 - 68, 2007

[16] Papadimitratos, V. Gligor, and J.-P. Hubaux. "Securing Vehicular Communications - Assumptions, Requirements, and Principles." In proceedings of the Workshop on Embedded Security in Cars (ESCAR) 2006, Berlin, Germany, November 2006.

[17] T. Leinmueller, L. Buttyan, J.-P. Hubaux, F. Kargl, R. Kroh, P. Papadimitratos, M. Raya, and E. Schoch. "SEVECOM - Secure Vehicle Communication." IST Mobile and Wireless Communication Summit, Mykonos, Greece, June 2006.

[18] P. Golle, D. Greene, and J. Staddon, "Detecting and correcting malicious data in vanets" In Proceedings of the first ACM workshop on Vehicular ad hoc networks, pages pp. 29-37, 2004.

[19] A. Carter, "The status of vehicle-to-vehicle communication as a means of improving crash prevention performance" Tech. Rep. 05-0264, NHTSA, 2005.

[20] http ://www.car-to-car.org/

[21] http ://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-12/CAMP3/pages/VSCC.htm

[22] Murphy, P. Welsh, E. Frantz, J.P., "Using Bluetooth for short-term ad hoc connections between moving vehicles : a feasibility study" Dept. of Electr. & Comput. Eng., Rice Univ., Houston, TX ; IEEE 55th Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002.

[23] Ni, S.Y., Tseng, Y.C., Chen, Y.S., Sheu, J.P., "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network" ,In : Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99). (1999) 152-162

[24] Madhavi W. Subbarao, "Ad Hoc Networking Critical Features and Performance Metrics Wireless Communications" Technology Group, NIST, White Paper, October 7, 1999

[25] Com2REACT, European project, www.com2react-project.org

[26] REACT, European project, www.react-project.org

[27] ITS Standards Advisory. http ://www.standards.its.dot.gov/Documents/dsrc advisory.htm.

[28] Federal Communications Commission. Amendment of the Commission's Rules Regarding Dedicated Short-Range Communication Services in the 5.850-5.925 GHz Band, FCC 03-324. FCC Report and Order, December 2003.

[29] Robert Wilson, "Propagation Losses Through Common Building Materials 2.4 GHz vs 5 GHz Reflection and Transmission Losses Through Common Building Materials" University of Southern California ; November 2003

[30] Michael, L.B. Kikuchi, S. Adachi, T. Nakagawa, M., "Combined cellular/direct method of inter-vehicle communication" Dept. of Inf. & Comput. Sci., Keio Univ., Yokohama ; IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000 Dearborn, MI, USA. On page(s) : 534-539

[31] Barth, M. Lei Xue Yi Chen Todd, M., "A hybrid communication architecture for intelligent shared vehicle systems" Coll. of Eng., California Univ., Riverside, CA, USA ; Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE, 17-21 June 2002 Volume : 2, On page(s) : 557- 563 vol.2

[32] Hamid Aghvami, Mischa Dohler, Fatin Said, "HiperLAN2 for Vehicle-to-Vehicle Communication" King's College London, UK, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on 2002

[33] Elbahhar, F. Rivenq, A. Heddebaut, M. Rouvaen, J.M., " Using UWB Gaussian pulses for inter-vehicle communications" UMR CNRS, Univ. de Valenciennes, France ; Communications, IEE Proceedings- Publication Date : 8 April 2005, Volume : 152, Issue : 2, On page(s) : 229- 234

[34] R. Hallouzi, V. Verdult, H. Hellendoorn and J. Ploeg, "Experimental Evaluation of a Co-operative Driving Set-up Based on Inter-vehicle Communication", in Proceedings of the IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon, July 5-7, 2004.

[35] H. Fujii, "Experimental Research on Inter-Vehicle Communication using Infrared Rays", Proc. IEEE Intelligent Vehicles 1996 Symposium, pp.266-271 (1996)

[36] K.Tokuda, M.Akiyama, and H.Fujii,"DOLPHIN for Inter-Vehicle Communications System", IEEE IV2000, pp.504-509, 2000

[37] K.Tokuda, "Inter-Vehicle Communications Technologies for Demo-2000", IEEE IV2001, pp.339-344, 2001.

[38] Y.Shiraki, T.Ohyama, S.Nakabayashi, K.Tokuda, "Development of an Inter-Vehicle Communication System", OKI Technical Review, Vol.68, No.3, pp.24-25, 2000.

[39] ABRAMSON, N, "The ALOHA system-another alternative for computer commumcations" Proc AFIPS 1970 FJCC, Vol 37, AFIPS Press, Montvale, N J , pp 281-285.

[40] Te-Kai Liu Silvester, J.A. Polydoros, A., "Performance evaluation of R-ALOHA in distributed packet radionetworks with hard real-time communications" Dept. of Electr. Eng. Syst., Univ. of Southern California, Los Angeles, CA ; IEEE 45th Vehicular Technology Conference, Chicago, IL, USA, 25-28 Jul 1995, Volume : 2, On page(s) : 554-558 vol.2

[41] Y.Kim and M.Nakagawa,"R-ALOHA Protocol for SS Inter-Vehicle Communication Network Using Head Spacing Information" IEICE Trans.Commun.,vol.E79-B, no.9, Sept.1996.

[42] R.Verdone,"Multihop R-ALOHA for intervehicle communications at millimeter waves," IEEE Trans.Vehi.Tech., vol.46,no.4, On page(s).992-1005,Nov.1997.

[43] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana, L. Fratta, "RR-ALOHA, a Reliable R-ALOHA broadcast channel for ad-hoc inter-vehicle communication networks", Med-Hoc-Net 2002, Baia Chia, Italy.

[44] L. Briesemeister, L. Schafers, and G. Hommel, "Disseminating messages among highly mobile hosts based on inter-vehicle communication", in Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, October 2000.

[45] T. Nagaosa, Y. Kobayashi, K. Mori, and H. Kobayashi, "An advanced CSMA inter-vehicle communication system using packet transmission timing decided by the vehicle position", in Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 2004.

[46] SHIBA Toru , Yohei Kawamagari, Masahiro Fujii, Makoto Itami, Kohji Itoh, "A Study of Integrated Inter-Vehicle Communication and Road to Vehicle Communication System Using Space Division Transmission" ,ITS2006 Oct, 2006

[47] J. Zhu and S. Roy, "MAC for Dedicated Short Range Communications in Intelligent Transport Systems," IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 12, 2003.

[48] D. Lee, R. Attias, A. Puri, R. Sengupta, S. Tripakis, and P. Varaiya. A wireless token ring protocol for intelligent transportation systems. In Proc. of the IEEE Intelligent Transportation System Conference (ITSC'01), 2001.

[49] Mustafa Ergen, Duke Lee, Raja Sengupta, and Pravin Varaiya,"WTRP-Wireless Token Ring Protocol" IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 53, NO. 6, NOVEMBER 2004

[50] H. Hartenstein, B. Bochow, A. Ebner, Matthias Lott, Markus Radimirsch, and Dieter Vollmer, "Position-Aware Ad Hoc Wireless Networks for Inter-Vehicle Communications : the Fleetnet Project," in Proc. ACM Mobihoc'01, 2001.

[51] Qing Xu, Raja Sengupta, and Daniel Jiang, "Design and Analysis of Highway Safety Communication Protocol in 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication Spectrum," in IEEE VTC 2003 Spring, 2003.

[52] G. Anastasi, L. Lanzini, and E. Mingozzi, "HIPERLAN/1 MAC protocol : stability and performance analysis". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 18(9) :1787-1798, September 2000.

[53] J. Sobrinho and A. Krishnakumar. "Quality-of-service in ad hoc carrier sense multiple access wireless networks". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17(8) :1353-1368, August 1999.

[54] Back Holger Füßler Sascha Schnaufer Matthias Transier Wolfgang Effelsberg, "Vehicular Ad-Hoc Networks : From Vision to Reality" 4th Annual IEEE/IFIP Conference on Wireless On Demand Network Systems and Services (WONS), Obergurgl, Austria, January 2007

[55] IEEE P1609.2 Version 1 - Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages. In development, 2006.

[56] Y. Xiao. "Enhanced DCF of IEEE 802.11e to support Qos". Proceedings of IEEE WCNC, pages 1291-1296, 2003.

[57] Emanuel Fonseca, Andreas Festag, Roberto Baldessari, Rui Aguiar, "Support of Anonymity in VANETs-Putting Pseudonymity into Practice" IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC),Hong Kong, March 2007

Chapitre 3

Architecture de communication

FIG. 3.1 – La nouvelle Flotte de véhicules composée de quatre Citroën C3

Depuis 1999, le groupe STI[1] dispose d'un prototype de véhicule intelligent baptisée LaRA (pour LA Route Automatisée). Ce véhicule constituait jusqu'au 2004 l'unique plateforme d'expérimentations pour la conception de systèmes avancées (mais autonomes) d'aide à la conduite au sein du centre de robotique. Ce premier prototype intelligent a participé à plusieurs projets parmi lesquels Carsense (2000-2002) et Arcos [1]. La figure 3.2 montre le prototype intelligent Renault Espace du centre entouré de l'ensemble de ses capteurs et piloté par la plateforme logicielle RTMaps.

Le prototype Renault Espace comprend :

- Des capteurs de positionnement :
  1. Un DGPS Trimble AG 132
     Fréquence 1Hz ou 10 Hz
     Latence théorique $<$ 100 ms
     Précision sub-métrique (PDOP $<$4)
     Vitesse différentielle avec une précision $<$ 0.16 km/h
  2. Une centrale inertielle IMU de Crossbow VG600
     Trois accéléromètres pour mesurer les accélérations sur les trois axes
     Trois gyromètres pour mesurer les vitesses angulaires
     Fréquence 84 Hz
- Des capteurs de perception
  1. Quatre caméras :
     Une caméra couleur avant
     Une caméra arrière grand champ

[1]Systèmes de Transport Intelligent

FIG. 3.2 – Le prototype LARA Renault Espace et l'ensemble des capteurs embarqués

Deux caméras intégrées dans les rétroviseurs externes du véhicule

2. Un radar *Autocruise* longue portée
3. Un télémètre laser *IBEO LD Automotive* mono-faisceaux à temps de vol.
   Résolution angulaire 0.25°
   Angle d'ouverture 270°
   Fréquence d'acquisition 10 Hz
   Portée de 150 mètres Précision de distance : ±5 cm

– Un tableau de bord entièrement numérique et reconfigurable.

– Des capteurs et actionneurs pour le contrôle latéral du véhicule (la colonne de direction).

Depuis 2003, et avec la volonté de démarrer la recherche dans le domaine de la conduite coopérative, le centre a acquis quatre nouveaux véhicules Citroën C3 présentés sur la figure 3.1. L'expertise acquise dans le centre a permis de transformer ces 4 véhicules en une plateforme de prototypes intelligents identiques. Dans une vision d'homogénéité et

de possibilité d'évolution, l'équipe STI a proposé une architecture dédiée à ces C3. Cette architecture est schématisée sur la figure 3.3.

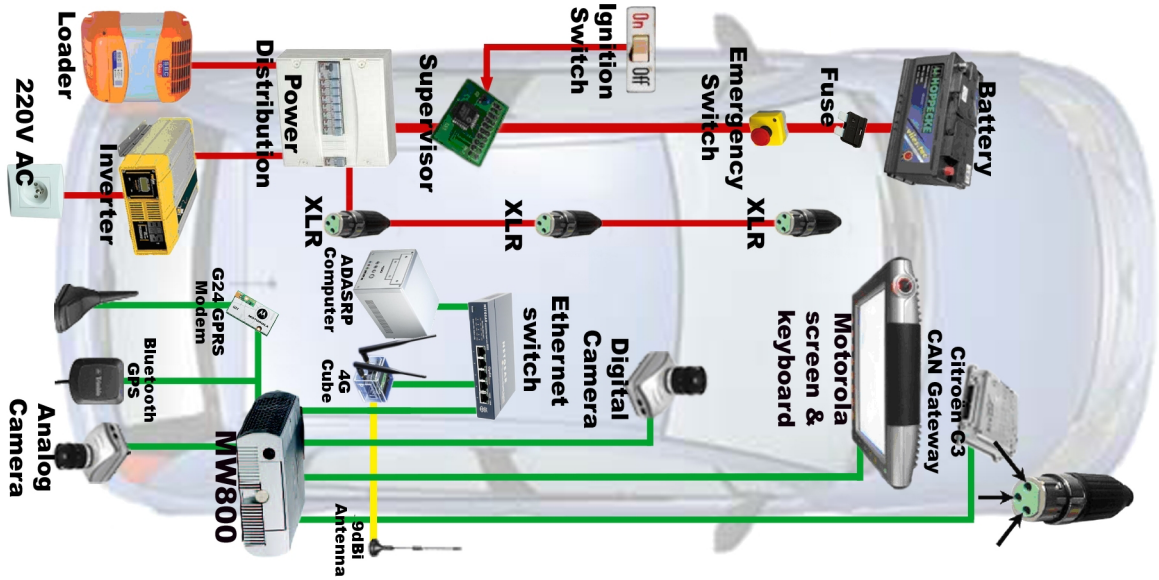

FIG. 3.3 – L'architecture interne des C3 LARA

Comme présenté sur la figure 3.3, l'architecture du véhicule est composée d'un ensemble de capteurs articulés autour d'un système informatique embraqué. Cette architecture comporte :

- Une caméra Marlin pour la vision avant.
- Deux GPS : un Trimble DGPS AG332,
  Fréquence 1 Hz/10 Hz,
  12 canaux de tracking des satellites,
  Deux ports (en RS332 ou CAN 2.0B chacun),
  Précision sub-métrique en mode différentielle avec correction,
  Signal PPS (Pulse Per Second),
  Messages NMEA ou TSIP,
  Compatible avec les corrections WAAS/EGNOS, Radio Beacon, Omnistar, RTK (Real Time Kinematic)
  Une antenne Trimble de type Spot.

  et un deuxième GPS grand public d'une fréquence de 1 Hz

- Un écran tactile à droite du conducteur et servant comme IHM pour les applications

développées

- Un décodeur du Bus CAN du véhicule : ce décodeur, fabriqué spécialement par PSA pour le centre de robotique, donne accès à quelques informations des capteurs internes du véhicule, telles que :
  - La vitesse longitudinale du véhicule,
  - La vitesse des deux roues arrière,
  - L'angle de braquage du volant,
  - L'état des freins,
  - L'état de la boîte de vitesse,
  - Les informations sur tous les feux du véhicule ;

- Un système d'alimentation composé de batteries complémentaires et d'onduleurs pour fournir la puissance et les différents niveaux de tension nécessaires au bon fonctionnement des capteurs.
- Un modem UMTS/GPRS qui relie le système embarqué au réseau cellulaire. Cette passerelle peut assurer au véhicule un accès au réseau cellulaire de communication ainsi qu'à internet. Cet accès est bien sûr fait avec un faible débit et une grande latence.
- Un 4GCube : boîtier de communication Wifi.
- Un point d'accès Dlink 2100+ 802.11g+.
- Une antenne omnidirectionnelle de 9 dB.
- La plateforme logicielle RTMaps sous Windows XP : les capteurs embarqués sur le véhicule sont reliés à un même système informatique embarqué RTMAPS [3]. C'est une plateforme d'acquisition et de synchronisation des données hétérogènes de différents capteurs. Ce logiciel est issu des travaux du centre de robotique en 2001 [2]. Grâce à un système enregistreur/lecteur universel, ce logiciel permet de rejouer les expérimentations et de re-créer le flux de données comme dans une expérimentation réelle. Ce logiciel est complété aussi par un environnement de développement SDK[2] dédié. Cette suite logicielle constitue la plateforme logicielle utilisée pendant les expérimentations, pour le développement des algorithmes de traitement et pour le test des algorithmes avant toute implémentation embarquée sur véhicule.

3.1 Matériel de communication

Afin de démarrer les expérimentations et proposer des services à base de communications V2V, nous étions amenés à choisir une solution matérielle parmi les technologies de communication existantes.

[2]Software Developement Kit

Le Wifi constituait une bonne solution pour les raisons suivantes :

1. La norme 802.11 p, qui est une variété du protocole wifi, est fortement pressentie comme le prochain protocole de communication inter-véhiculaire. Le matériel 802.11 est par conséquent parmi les plus adaptés pour nos expérimentations. Il sera exploité dans le but de contribuer aux tests de la performance de cette technologie sur les véhicules.
2. L'interopérabilité et la disponibilité des matériels Wifi sur le marché grand public contribuent à motiver l'utilisation de ce matériel dans nos expérimentations ainsi que le succès de la phase d'introduction de cette technologie sur le marché des communications indoor.
3. La facilité d'intégration de cette technologie dans le système déjà embarqué sur véhicule et la possibilité de liaison via une multitude d'interfaces Ethernet/USB/PCMCIA
4. La possibilité d'ajouter des antennes amplificatrices pour augmenter la portée de la communication
5. L'existence des deux modes Ad hoc et infrastructure
6. Le débit confortable qu'offre cette technologie

Pour toutes ces raisons et après plusieurs tests préliminaires sur véhicules, nous avons choisi d'utiliser des points d'accès Dlink utilisant la norme 802.11 g+. Les références techniques et les performances théoriques des points d'accès utilisées sont données dans l'annexe A.

Sur la figure 3.4, nous montrons le schéma de connexion des points d'accès. Sur chaque véhicule le point d'accès est relié via l'interface Ethernet au PC embarqué. Les points d'accès constituent donc l'interface entre le système informatique et le canal hertzien au niveau de la couche physique (Modulation) et de la couche MAC (gestion de collision). Les points d'accès sont reliées aux antennes 9dB (ou 7 dB) installées sur les toits des véhicules. Ils sont utilisés en mode Bridge (ou pont) pour relayer l'information entre les deux véhicules.

Théoriquement, cette configuration doit délivrer les performances suivantes :

- Portée : la portée de la communication est donc calculée en fonction de la puissance du signal émis, de la sensibilité du récepteur et des pertes dans le réseau selon la formule suivante :

$$P_{recep} = P_{emis} - L_{traj} + G_{emis} + G_{recep} - L_{cable} \tag{3.1}$$

P_{recep} = puissance reçue en dBm ;
P_{emis} = puissance émise en dBm ;
L_{traj} = Atténuation du signal pendant son parcours dans le canal de transmission ;
G_{emis} = gain de l'antenne à l'émission en dBi ;

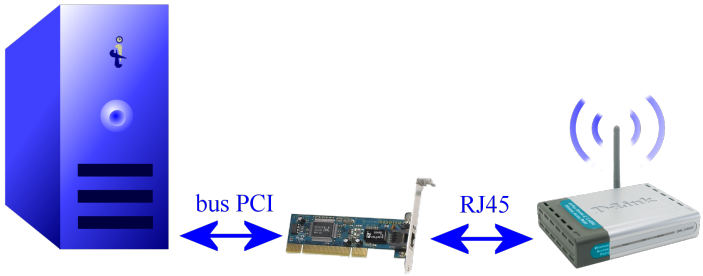

FIG. 3.4 – La chaine de liaison entre le PC embarqué et le point d'accès Wifi via la carte Ethernet

G_{recep} = gain de l'antenne à la réception en dBi ;
L_{cable} = perte dans les câbles à l'émission et à la réception en dB ;

En réalité, les perturbations dues au canal de transmission ne peuvent pas être réduites à une simple atténuation. En effet, il existe des phénomènes beaucoup plus complexes comme la réflexion, la diffusion, etc. A cause de ces multiples phénomènes, la proposition d'un modèle des pertes dans le canal reste une tâche assez complexe. Durant nos tests, nous allons essayer de prendre en compte l'effet de l'environnement en effectuant nos tests dans plusieurs types d'environnement. Notons aussi que le sujet de la modélisation du canal de communication est un sujet beaucoup plus complexe et qui mérite plus d'attention et d'étude.
Dans notre étude, nous supposons que l'atténuation du signal dans le canal de transmission est donnée par l'équation 3.2 :

$$L_{traj} = 10log\frac{4\pi df}{c}; \tag{3.2}$$

d est la distance entre les antennes d'émission et de réception en mètres ;
f est la fréquence de communication en Hz ;
c est la célérité de la lumière ;

La figure 3.5 illustre la portée théorique des outils de communications en fonction de la sensibilité des cartes réceptrices. Chaque courbe correspond à une puissance d'émission donnée. Les courbes sont dessinées dans les marges de manœuve des caractéristiques des points d'accès utilisés : la sensibilité varie entre 66 et 87 dBm, la puissance d'émission varie entre 14 et 18 dBm. La fréquence utilisée est 2.4 GHz, le G_{emis} et le G_{recep} sont pris à 7 dB et les pertes dans les câbles et les connectiques de chaque côté de la chaîne de communication sont estimées à 1.5 dB. Nous constatons sur la figure 3.5 que la portée théorique maximale est aux alentours de 1 Km. Nous ne nous sommes pas contentés de

cette portée théorique mais nous avons effectué des tests de mesure de la portée réelle, celle-ci dépendant considérablement de l'environnement de mesure.

Les tests des nouveaux services proposés vont être effectués essentiellement sur deux

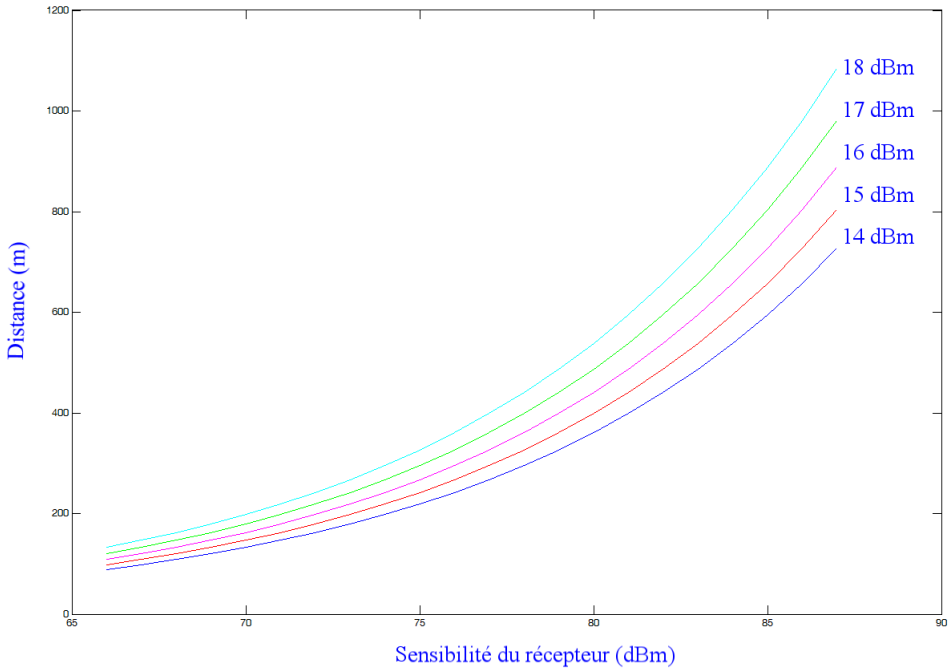

FIG. 3.5 – La portée théorique des outils de communications en fonction de la sensibilité du récepteur et paramétré par la puissance du signal émis

véhicules, les points d'accès sont donc utilisés en mode Point à point.

3.2 Logiciel de communication

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, nous avons choisi d'utiliser des outils de communication Wifi. Afin d'exploiter ces outils dans notre plateforme embarquée, nous avons été amenés à développer une interface logicielle entre ces outils et notre système d'acquisition temps réel.

Ce logiciel doit donc jouer un double rôle :

- Avoir un accès en temps réel aux informations des différents capteurs embarqués sur le véhicule.

- Organiser ces informations dans des paquets de communications à forme prédéfinie et compréhensible par le matériel de communication choisi.

D'une manière générale, les paquets de communication sont formés en encapsulant progressivement les informations provenant de chaque couche de la pile protocolaire dans les informations de la couche qui lui est directement inférieure. Le protocole de communication sert à définir les informations ajoutées par chaque niveau de la pile protocolaire dans le paquet final.

En l'absence d'un protocole de communication dédié au réseau véhiculaire et avec l'adoption des outils 802.11 pour faire les expérimentations, le défi était de choisir un protocole qui répond aux exigences suivantes :

- Une communication non orientée connexion : la nature éphémère des liaisons dans un réseau véhiculaire en perpétuel mouvement rend lourde la phase de l'établissement de connexion surtout en comparaison avec la durée totale de la communication. Par conséquent, l'établissement de la connexion complique les expérimentations. Ainsi les véhicules seront obligés de s'identifier et de s'interconnecter après toute coupure de la communication. Bien que l'établissement de connexion soit nécessaire pour des raisons de sécurité de l'information, son utilisation lors de nos expérimentations n'est pas du tout utile voire gênante.

- Une transparence vis à vis de l'identité du véhicule : il doit y avoir une transparence totale entre le matériel de communication et le véhicule utilisé. Cette caractéristique facilite la gestion des véhicules. En effet, le logiciel doit pouvoir interfacer les points d'accès Wifi avec n'importe quel véhicule de notre flotte.

- Une flexibilité dans le choix des données communiquées : cette interface logicielle doit gérer le choix de l'application étudiée pendant les expérimentations et par la suite de sélectionner les informations à communiquer, la fréquence de communication et le format des paquets communiqués.

- Un contrôle sur le format des paquets, leur taille et la fréquence de communication : l'utilisation d'un protocole de communication existant nous oblige de respecter un format prédéfini du paquet. Ceci signifie l'introduction dans les paquets des informations exigées par le protocole et pas forcément utiles à nos applications. Citons à titre d'exemple les adresses IP pour les protocoles IP. Nous préférons avoir le minimum de ces informations dans nos paquets de manière à avoir les paquets les plus compacts possibles et par la suite un débit de données plus efficace.

Ces idées et exigences rejoignent les travaux présentés par [5] et repris dans [6]. Ces deux travaux proposent une architecture basée sur une architecture d'escalier ou "Stair-

case" selon le terme utilisé. Cette architecture, et comme son nom l'indique, est présentée en forme d'escalier sur la figure 3.6. Elle offre la possibilité de relier la couche de gestion de liaison à la couche d'application si l'acheminement des données est effectué en un saut unique (single hop). Cette architecture est proposée dans une perspective de réduire les délais dans la production des paquets à forte contrainte temporelle (comme dans les applications de pré-crash). Tout de même, cette architecture offre une alternative à l'architecture rigide des couches.

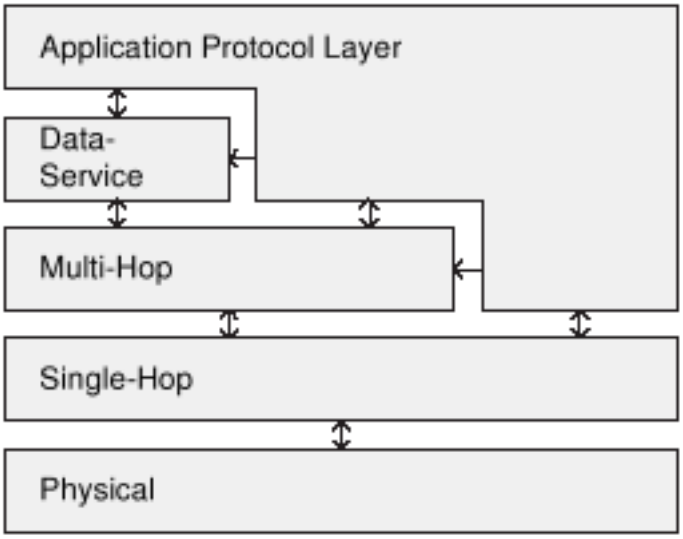

FIG. 3.6 – L'approche Escalier ou "Staircase"

Dans nos applications, nous supposons que l'échange des informations entre les véhicules se fait en single hop. Les véhicules ne jouent donc pas le rôle de relais de l'information et la portée de la communication sera du coup limité à la portée des outils utilisés.

Sur la figure 3.7, nous montrons une schématisation de notre approche. Ainsi, l'interface avec le canal de transmission, c'est à dire la couche physique et la gestion des collisions, est confiée au point d'accès Wifi. Ces deux couches sont directement interfacées avec la couche application. Le niveau applicatif possède deux fonctions essentielles :

1. En mode émetteur : collecter les informations à communiquer et constituer les paquets.
2. En mode récepteur : décrypter les paquets reçus et récupérer les informations en provenance des autres véhicules

Après avoir testé plusieurs outils informatiques de gestion de communication à bas niveau, nous avons choisi d'utiliser la librairie "libcap" sous sa version Windows "Winp-

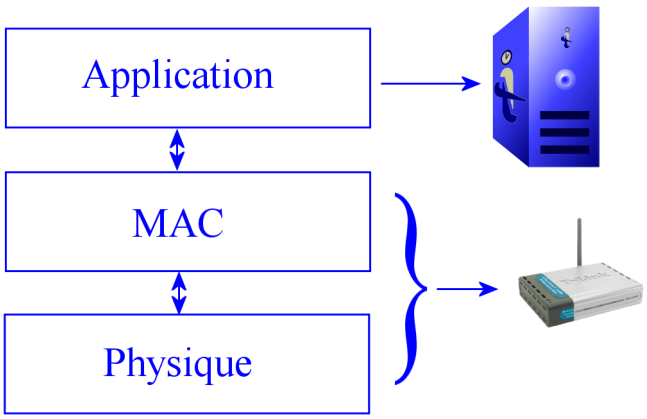

FIG. 3.7 – La modélisation de notre approche de communication à trois couches

cap" [4]. La librairie WinPcap est largement utilisée pour la conception d'applications de gestion et de monitorat des réseaux informatiques.
Nous rappelons tout de même que nos points d'accès Wifi sont reliés physiquement aux PCs embarqués par le biais des cartes Ethernet. L'utilisation de Winpcap permet à la couche applicative de surpasser la gestion des cartes Ethernet. Nous utilisons donc les possibilités de modulation et de capture des paquets sur ces cartes d'une manière transparente vis a vis de l'application sans être amenés à utiliser des protocoles spécifiques.

Afin de réaliser la couche applicative, nous avons interfacé cette librairie avec le logiciel RTMaps. Le composant "MapsPcap" ainsi réalisé, est un logiciel de type "sniffer". En effet, le sniffer est un nom générique pour désigner tout logiciel capable d'écouter le canal de transmission, de capter les paquets qui y circulent et d'analyser leurs contenus. En mode émission de données, ce logiciel sert à formuler les paquets sous notre propre format sans y ajouter des entêtes (ou headers) spéciales à un protocole donné. Le mode réception a comme fonction essentielle d'écouter (ou sniffer) le canal de transmission. Il capte les paquets qui y circulent, analyse leur contenu et en extrait les informations destinées à la couche applicative.

MapsPcap permet d'allier la force d'une librairie de gestion de communication à bas niveau Winpcap et une plateforme d'acquisition et de traitement temps réel RTMaps. La figure 3.8 est une capture d'écran d'un diagramme RTMaps. Dans ce diagramme, le composant MapsPcap collecte en temps réel des informations de position, de vitesse et de freinage pour les transmettre à travers l'interface Ethernet.

La figure 3.9 donne une image de l'IHM de gestion du composant MapsPcap. Grâce à cette interface réalisée à l'aide de l'API Win32, nous pouvons gérer tous les aspects de

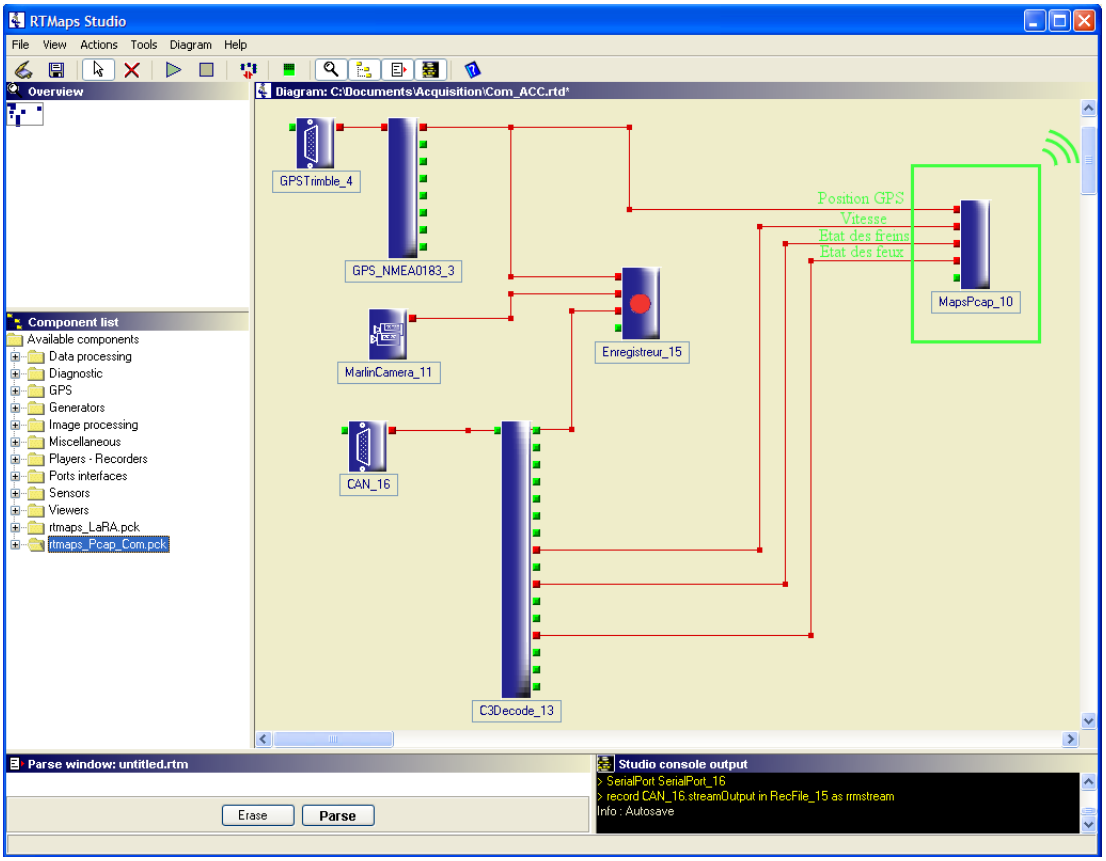

FIG. 3.8 – Un diagramme Maps pour la gestion des interdistances entre les véhicules. Le composant MapsPcap collecte les informations en temps réel pour les transmettre

notre communication : le choix de la carte Ethernet reliée au point d'accès, le choix de l'application à réaliser et par la suite les données à envoyer ou à recevoir, la détermination de la fréquence de communication. La partie "statistics" est consacrée aux statistiques et mesures effectuées en temps réel sur les données envoyées et reçues (débits moyen et instantané, nombre de paquets, taille des paquets...).

L'utilisation de cette IHM facilite considérablement les expérimentations. Il suffit donc de placer le composant dans un diagramme de flux de données RTMaps et la gestion de la communication se fait ensuite à travers cette interface.

Effectivement, le composant MapsPcap collecte les données à envoyer selon le type de l'application désignée sur l'interface. Il organise ensuite ces données dans un paquet de données. La figure 3.10 donne notre définition du format d'un paquet de données. Le

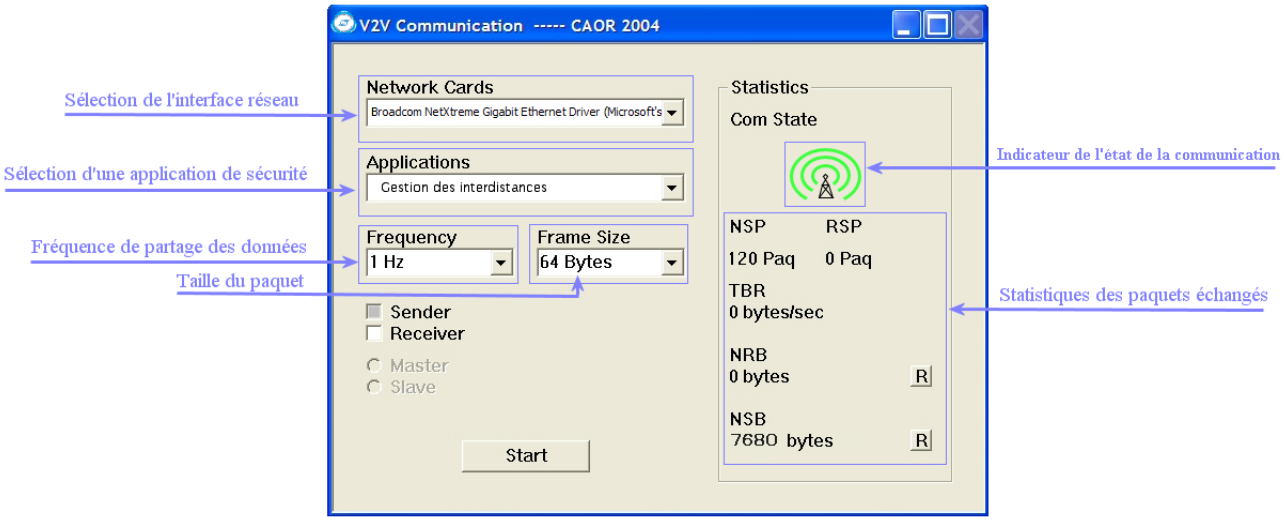

FIG. 3.9 – L'interface du composant MapsPcap pour la gestion des communications V2V

premier champ ID est un identificateur du véhicule. Le champ SERVICE sert à déterminer la nature du paquet et son utilité dans l'application en cours d'exécution. Par la suite, le type de service sert aussi à identifier le type des données dans le champ DATA.

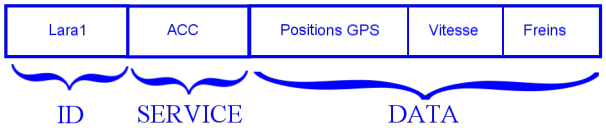

FIG. 3.10 – Un exemple de paquets communiqués : le champ ID désigne le véhicule *Lara1* qui échange un paquet pour la gestion des interdistances (ACC), les données échangées sont les positions GPS, la vitesse du véhicule et l'état des freins

L'échange d'informations se fait donc entre les véhicules en utilisant ce type de paquet. Notons que le paquet ne contient d'ailleurs que les données utiles à l'application visée. Le format des paquets est un format spécifique et reconnu sur tous les véhicules. L'ajout de nouvelles applications se fait donc en ajoutant un nouvel identifiant de service et les champs de données appropriés.

3.2.1 Validité des données

L'un des problèmes majeurs que nous avons rencontrés lors de nos expérimentations était de s'assurer de la validité des données échangées entre les véhicules. Des erreurs peuvent provenir des systèmes informatiques, de l'indisponibilité des données GPS ou bien d'un simple bug informatique. Pour cette raison, nous avons ajouté une annexe (extension) de données à chaque paquet. Cette annexe comporte :

1. Un champ de numéro de paquet : chaque paquet est numéroté avant d'être émis. Ce numéro nous permet de constater toute perte de paquets et de suivre la bonne chronologie de réception de ceux-ci.
2. Un champ de temps d'émission ou "TimeStamp" du paquet : ce TimeStamp nous permet de vérifier la crédibilité des données reçues par rapport à leurs temps d'émission respectifs.

Ce double marquage nous aide pendant nos campagnes de mesure à comprendre le comportement de nos outils de mesure et surtout d'éliminer toutes les données qui ne remplissent pas les conditions de validité imposées sur ces deux marquages.

3.3 Performance de la communication

La performance de l'architecture de communication proposée est articulée autour de deux axes :

1. La fiabilité de la communication : c'est la capacité d'assurer la transmission d'une information entre deux nœuds. C'est une notion assez générale qui dépend de plusieurs facteurs. Quantifier cette efficacité revient donc à estimer l'effet de ces facteurs sur la qualité de la communication. Parmi ces facteurs, nous citons la portée, le débit, la vitesse des véhicules, etc.
2. La latence : c'est le délai temporel que subit un paquet entre l'émission et la réception. Nous ne nous intéressons pas seulement à la bonne réception de l'information mais nous nous intéressons aussi au moment où elle a été reçue. La contrainte sur cette latence est d'autant plus grande que le temps de réaction après la réception de l'information est minime. Tel est bien le cas dans les applications de sécurité routière.

Ces deux contraintes constituent les critères essentiels autour desquels tourne la notion de la qualité de service QoS dans le domaine de la communication. La mesure de la performance de cette architecture constitue une étape importante pour pouvoir concevoir des services réalistes d'aide à la conduite. Les outils informatiques de mesure de la performance sont conçus sur la plateforme logicielle précédemment présentée. Le but de ces tests de performance est de quantifier les capacités de notre configuration matérielle

et logicielle d'où l'exclusion de l'utilisation de tout outil informatique étrange à notre architecture.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter les tests de performance effectués à l'aide de l'architecture présentée. La caractérisation des outils de communication n'étant pas une tâche bien aisée, ces tests ont été étalés pendant toute la durée de la thèse. Chaque nouveau test apportera une nouvelle dimension à la base de données étudiée. En effet ces tests ont été reconduits avec l'ajout de tout nouveau matériel sur les véhicules, avec l'adoption d'un nouveau milieu de test ou bien avec l'amélioration de la précision d'un capteur.

Afin d'avoir une idée de la richesse des endroits de tests, nous citons, dans la suite, les sites qui ont été lieux pour nos expérimentations :

- Le sixième arrondissement de Paris autour du jardin du Luxembourg,
- Le quartier résidentiel du quinzième arrondissement de paris,
- Les croisements du quartier des invalides dans le septième arrondissement,
- L'autoroute A6 entre Paris et Orly,
- L'autoroute A11 entre Paris et Nantes,
- L'autoroute A13 entre Versailles et Paris,
- La piste Satory à Versailles,
- Le site de l'Inria Rocquencourt,
- La zone industrielles de Wissous,
- Les parkings du centre commercial Velizy,
- La route nationale 186 (route de Versailles)
- Le bois de Boulogne
- ...

La richesse dans le choix des endroits de mesures et de tests s'est traduite par une richesse dans la base de données constituée. Dans la suite, nous allons présenter l'analyse effectuée sur cette base de données de manière à présenter une description fidèle au comportement de notre système.

Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer la qualité de la communication. Citons à titre d'exemple la distance entre les véhicules, la visibilité directe, les vitesses des véhicules, le débit des données, l'environnement de mesure, les multi-trajets, etc. Dans la suite, nous présentons des tests dans lesquels nous essayons d'isoler chacun des ces facteurs à tour de rôle dans le but d'étudier son influence sur la qualité de la communication.

3.3.1 La portée de la communication

Nous définissons la portée de la communication comme la distance maximale possible entre deux véhicules en état de communication. La portée de la communication est un

facteur qui influence le choix du schéma de communication en saut unique ou multi-sauts (single ou multi-hop) et par la suite le choix des mécanismes de routage. Comme constaté sur le travail de simulation effectué dans [7] pour un schéma de communication multi-hop, augmenter la portée revient à augmenter le taux des collisions de paquets et par la suite à augmenter les délais de communication de bout en bout. D'autre part, diminuer la portée revient à diminuer la probabilité d'acheminement des données à cause de la restriction de la zone de couverture et par la suite à augmenter la perte des données. Cette distance maximale n'est pas seulement liée à la performance des outils de communication utilisés mais elle dépend également de l'environnement qui entoure les systèmes de communication. L'environnement est responsable de plusieurs effets d'absorption, d'atténuation, de diffraction, de réflexion... Ces effets influencent énormément la qualité du signal. Pour cela nous avons décidé de répéter le test de mesure de la portée dans plusieurs types d'environnement.

Le test de mesure de la distance est effectué en utilisant deux véhicules *Lara*. La première *(Lara1)* est statique autour de laquelle la deuxième *(Lara2)* fait des allées et des retours à faible vitesse. Le test s'effectue avec la plus petite vitesse relative possible pour étudier l'effet de la distance seule sur la qualité de la communication.
Le véhicule en mouvement envoie sa position GPS au véhicule statique qui calcule la distance euclidienne entre leurs positions respectives. Ces tests ont été répétés dans plusieurs environnements : milieux urbains, milieux périurbains, autoroutes et milieux ruraux.

Le sixième arrondissement de Paris, autour du jardin du Luxembourg, est un environnement typiquement urbain avec des bâtiments et des arbres sur les deux côtés de la route. Sur la figure 3.11, nous montrons (à gauche) une vue aérienne du site de l'expérimentation. Le disque blanc désigne la position du véhicule statique tandis que les flèches désignent les axes de déplacement de *Lara2*. A droite de la figure 3.11, nous reportons les positions de *Lara2* comme enregistrées sur le véhicule lui-même. Les points rouges reportent les positions du véhicule *Lara2* comme reçues par le véhicule *Lara1*. La distance entre les deux véhicules, calculée sur *Lara1*, est illustrée sur le figure 3.12. Nous remarquons une distance maximale de 300 mètres entre les deux véhicules.

Dans ce test, nous remarquons une différence dans la portée suivant les différents axes du parcours du véhicule en mouvement. Cette différence montre la sensibilité de la communication suivant la configuration de l'environnement de mesure. En plus, nous remarquons une différence entre la distance à partir de laquelle nous perdons une communication existante (que nous appelons *distance de perte*) et la distance à partir de laquelle nous rétablissons une communication déjà perdue (*distance de capture*). Sur la figure 3.12, la distance de perte sur les différents axes est bien plus importante que la distance de capture. Cet effet trouve son explication dans le mécanisme de validation du signal dans les points d'accès Wifi suivant la qualité du signal reçu. Ce mécanisme comporte

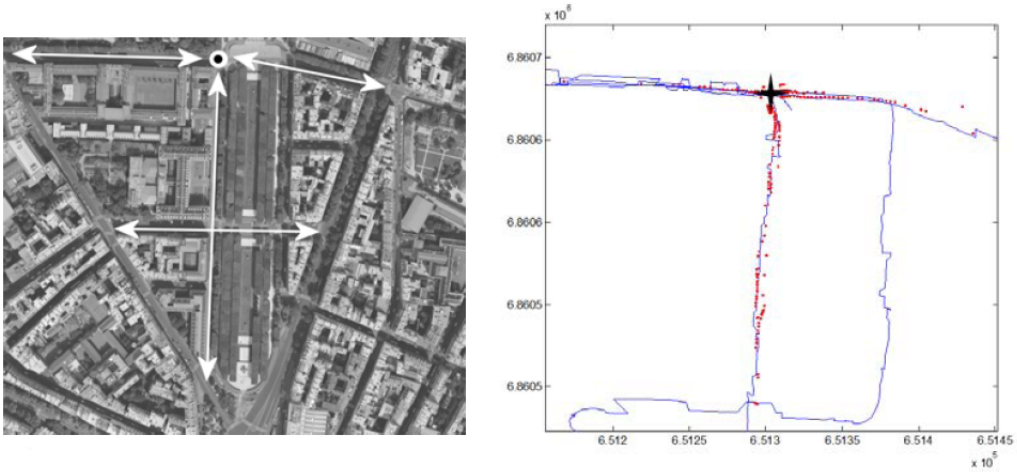

FIG. 3.11 – A gauche : le site de test dans un environnement urbain, le cercle désigne la position de *Lara1* et les flèches décrivent le déplacement de *Lara2* ; A droite : en bleu les positions de *Lara2* de son propre GPS et en rouge les mêmes positions reçues par *Lara1*

une hystérésis ou deux seuils pour accepter un signal : le système de réception continue à accepter la communication jusqu'à ce que le signal tombe au dessous d'un seuil S_1, tandis que pour accepter un nouveau signal, il faut que sa puissance soit plus grande qu'un seuil S_2. En général $S_1 < S_2$, ce qui fait que la distance de perte est généralement plus grande que la distance de capture.

Le même effet est constaté pendant les mesures sur le site périurbain (quelques arbres et des bâtiments à un seul étage). La figure 3.13 schématise un allée-retour sur une route rectiligne dans le campus de l'Inria Rocquencourt. Sur cette figure, la perte se produit à 250 mètres et la capture se fait assez tardivement autour de 30 mètres.

Le troisième test a été effectué sur une autoroute. Les autoroutes sont typiquement des endroits assez dégagés avec une visibilité directe entre les véhicules. Pour ces raisons et comme montré sur la figure 3.14, nous avons obtenus une portée plus importante de l'ordre de 500 mètres. La distance de capture est plus importante dans ce cas de figure, elle est aux alentours de 250 mètres. Il reste à préciser que pendant ce test, les deux *Lara* était en mouvement car, contrairement aux exigences de l'expérience, il n'était pas commode de se garer sur les autoroutes ou de faire des demi-tours. Sur cette figure, nous remarquons de longues périodes de perte des données dues à des grandes distances entre les deux véhicules.

Reste à noter que la plus grande portée que nous avons eue pendant nos tests était une portée de 750 mètres sur le site "route de Versailles". A noter, que cette portée n'est pas loin de la portée théorique maximale de 1000 m. La figure 3.15 illustre l'évolution

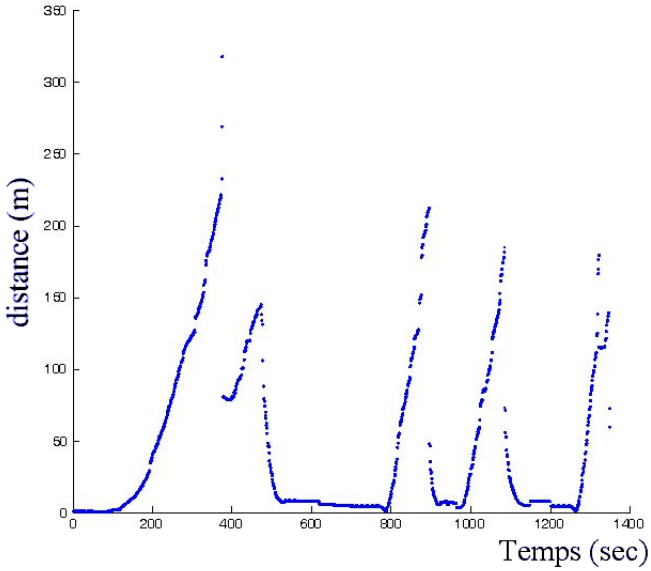

FIG. 3.12 – La distance entre *Lara1* et *Lara2* en fonction du temps durant le test dans un environnement urbain

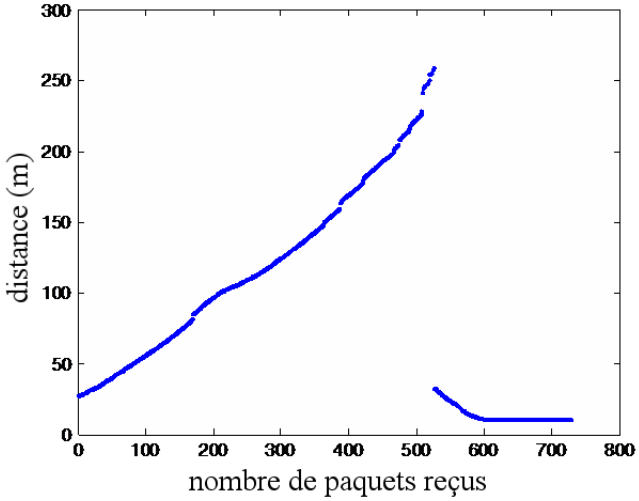

FIG. 3.13 – La distance entre *Lara1* et *Lara2* durant le test dans l'environnement péri-urbain

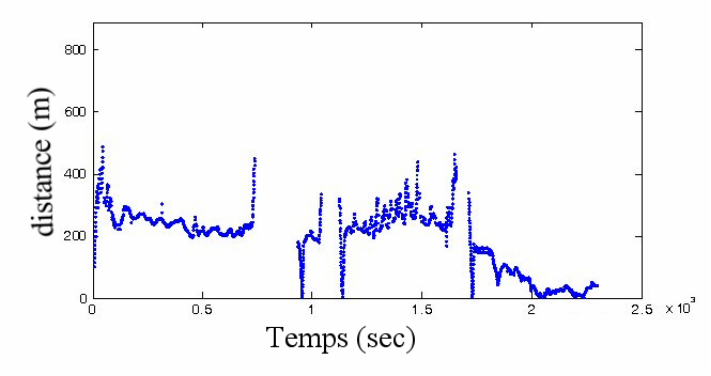

FIG. 3.14 – La distance entre *Lara1* et *Lara2* durant le test sur autoroute

de cette portée en fonction du temps. En fait, la communication continue à être valide à partir de la distance de 750 mètres et jusqu'au rapprochement de quelques mètres entre les deux véhicules.

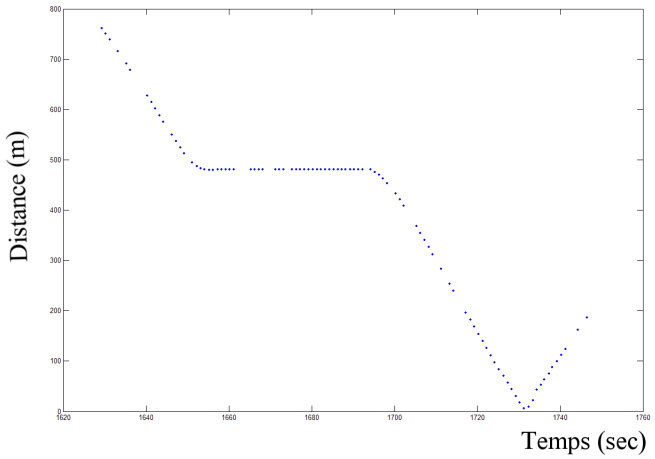

FIG. 3.15 – La portée maximale obtenue durant les tests

En conclusion, l'étude de la portée a montré que la distance de communication nominale est autour des 300 mètres. La distance de communication est très sensible à la configuration de l'environnement de mesure. Cette propriété a été traduite par le grand écart entre les portées constatées dans un même endroit de mesure mais selon plusieurs directions.

3.3.2 La bande passante

Nous définissons la bande passante comme étant la quantité d'informations échangées entre les véhicules et exprimée en bits par secondes (bps). La quantité d'informations est importante pour définir le type et la fréquence des informations à échanger.

La quantité d'informations est formulée selon deux facteurs : le nombre de paquets communiqués et la taille de chaque paquet.

Afin d'en estimer une borne supérieure, nous avons cherché à mesurer cette bande passante dans la configuration la plus favorable : les deux véhicules sont statiques et à faible distance l'une de l'autre, *Lara1* en mode émission et *Lara2* en mode réception.

L'émetteur tente de produire un maximum d'informations en utilisant des paquets de 1500 octets (c'est la taille maximale d'un paquet qui peut passer à travers une carte Ethernet) et en augmentant la puissance le processus d'émission à la puissance maximale du processus. Nous avons fait de même sur le côté réception. L'émetteur et le récepteur ont aussitôt pu produire (respectivement capter) un débit moyen de 60 Mbps. Un échantillon de ce débit est montré sur la figure 3.16. Cette capacité de produire du trafic est suffisante pour effectuer le test sur les points d'accès qui, théoriquement, dispose de 54 Mbps comme bande passante.

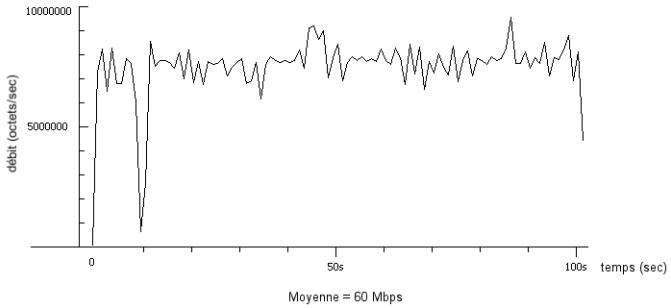

FIG. 3.16 – La capacité maximale de production de débit par les systèmes informatiques embarqués

Ce même flux est généré en utilisant la configuration de communication avec points d'accès Wifi. La figure 3.17 schématise le flux utile échangé entre les deux points d'accès. En moyenne, le débit est de 10 Mbps. Cette chute du débit d'un rapport de 1/6 peut être expliquée par la capacité réduite des points d'accès. En effet, ces points d'accès, autrement qu'acheminer les données utiles, doivent échanger des paquets de synchronisation et assurer des fonctions d'écoute et de partage de canal décrites dans le paragraphe 2.5.1. L'échange périodique de ces paquets influence la qualité de la communication et fait que ces points d'accès n'arrivent pas à assurer le suivi du flux émis par les cartes Ethernet.

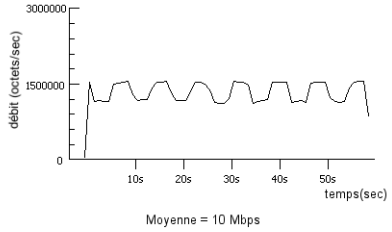

FIG. 3.17 – Le débit mesuré en nombre d'octets par seconde échangés à travers le système de communication Wifi

Malgré cette dégradation par rapport aux performances théoriques, les 10 Mbps constituent une bande passante suffisante pour un échange d'informations de type "donnée". Pour des applications de type "multimédia", il faut chercher à optimiser l'architecture pour permettre l'échange de données plus volumineuses.

3.3.3 La variation du débit en fonction de la distance

La simple étude de la portée de la communication ne permet pas de quantifier la qualité de la communication avec la distance. En effet, la notion de la portée présentée se limite à un résultat binaire : existence ou perte de la communication. En pratique, la qualité de la communication doit se dégrader à fur et à mesure de l'augmentation de la distance entre les deux nœuds en communication.
Dans le but de mesurer la relation entre la distance et la qualité de la communication, nous avons choisi de quantifier l'évolution du débit de la communication avec la distance entre les deux véhicules.
Les expérimentations ont été faites dans un quartier résidentiel assez dégagé de Paris. *Lara1* est fixe au bord de la route et *Lara2* s'éloigne du premier véhicule en ligne droite. La figure 3.18 montre une vue de l'endroit de mesure avec l'emplacement de *Lara1* et le parcours de *Lara2*.

La communication se fait avec des paquets de taille 128 octets par seconde et un intervalle de 100 msec entre deux paqutes (ce qui correspond à la cadence du récepteur GPS). Le débit est défini à un instant t comme étant le rapport entre le nombre de paquets reçus dans une fenêtre temporelle centrée en t divisé par la taille de cette fenêtre temporelle. Ce débit est exprimé dans l'équation 3.3. Vue la définition de ce débit, le calcul est donc fait en post-traitement et pas en temps réel pendant l'acquisition.

$$\text{débit} = \frac{\text{nombre de paquets reçus}}{\text{intervalle de temps de réception}} \tag{3.3}$$

Dans le but de lisser le débit calculé, nous avons choisi un grand intervalle de temps

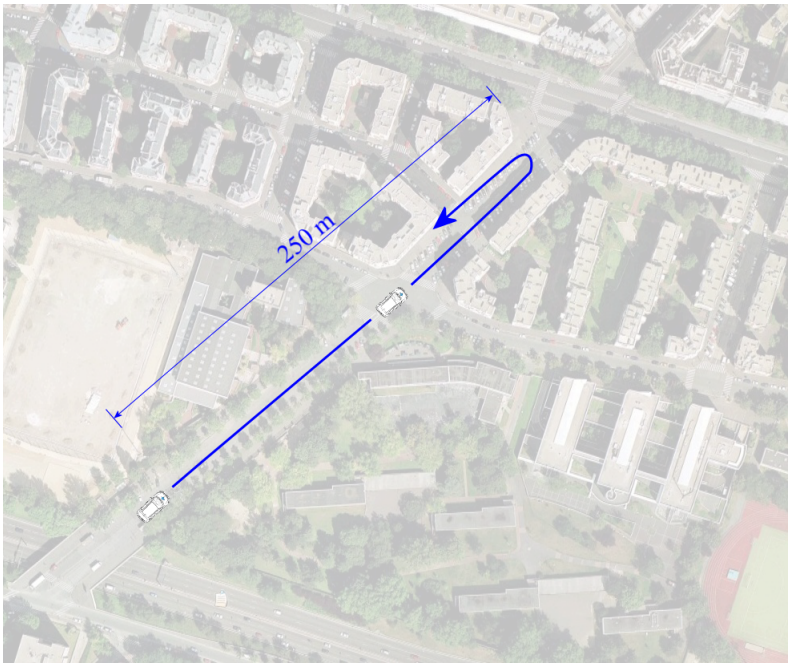

FIG. 3.18 – Le site de l'expérimentation sur le débit avec le parcours de *Lara1* et *Lara2*

égal 10*sec*. La vitesse pendant les expérimentations ne dépasse pas la 25 km/h pour minimiser l'erreur due à l'écart de vitesse entre les deux véhicules.

Sur la figure 3.19 nous illustrons l'histogramme de la répartition des débits maximal et minimal en fonction de la distance entre les véhicules. Nous remarquons que le débit maximal subsiste à 100% jusqu'à une distance de 150 mètres. Au delà, le débit maximal décroît continument mais reste supérieure à 50% pour la distance maximale étudiée de 220 mètres. Si nous examinons la valeur minimale du débit, nous remarquons qu'elle reste proche de la valeur maximale pour différentes valeurs de la distance. Néanmoins, elle reste toujours supérieure à 15%.

En examinant la répartition des valeurs minimales et maximales, nous remarquons que les valeurs moyennes et médianes obtenues sont plus proches de la valeur maximale ce qui signifie que la répartition du débit est plus condensée autour des valeurs élevées. Cette répartition assez logique du débit donne une bonne évaluation des performances de notre système. A noter que l'influence de l'environnement est très significative. Dans cette expérimentation, cette influence se manifeste par la fluctuation de la valeur minimale en fonction de la distance. Une fluctuation qui peut être expliquée par une occultation instantanée entre les deux véhicules ou une perturbation causée par l'entourage. En effet, l'examen de l'évolution de la distance entre les deux véhicules et le débit (montrée sur la

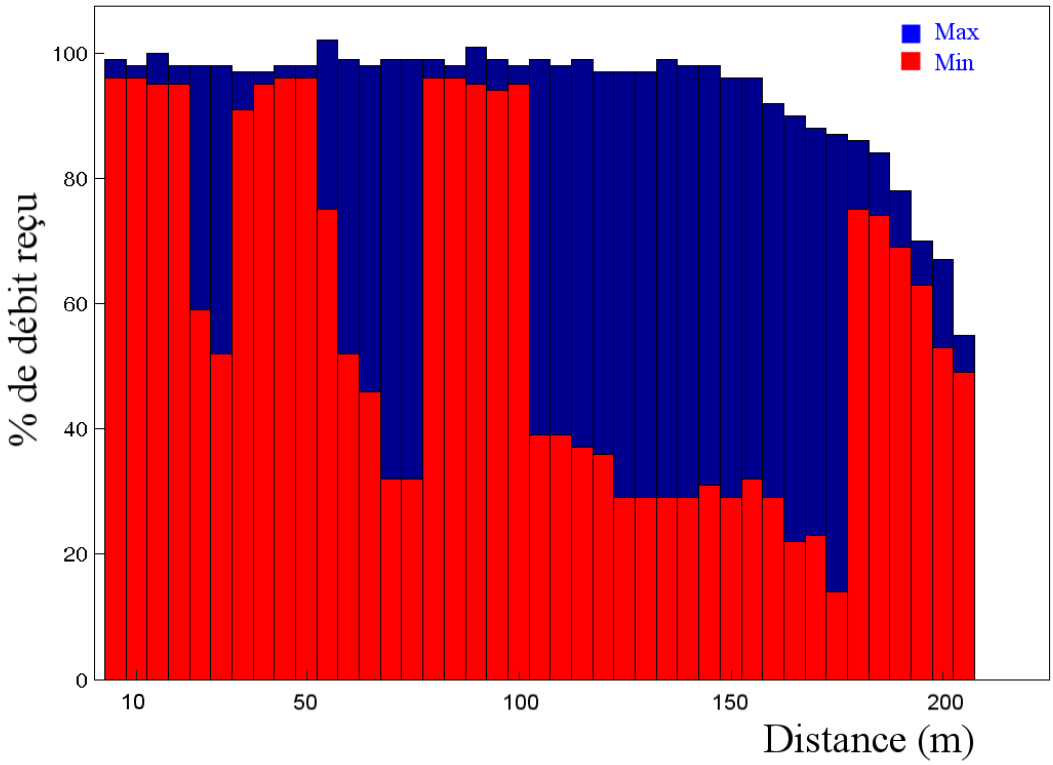

FIG. 3.19 – L'histogramme du débit en fonction des distances entre les véhicules

figure 3.20) permet de valider cette hypothèse. La fluctuation du débit n'est pas toujours due à une grande distance puisque nous remarquons sur la figure 3.20 des comportements et des valeurs différentes du débit pour des distances identiques entre les véhicules.

3.3.4 La variation du débit en fonction de la vitesse relative

Pour estimer la variation de la qualité de la communication avec la vitesse, il aurait fallu concevoir un test où le débit de la communication soit lié à la vitesse relative des deux véhicules sans être dépendant de la distance entre eux. Dans ce but, nous avons effectué le test illustré sur la figure 3.21 : *Lara1* est statique et autour duquel *Lara2* effectue une trajectoire circulaire avec différentes vitesses. Le test est effectué sur le site Vélizy. Toutefois, la difficulté d'assurer un site d'expérimentation plus grand nous contraint à

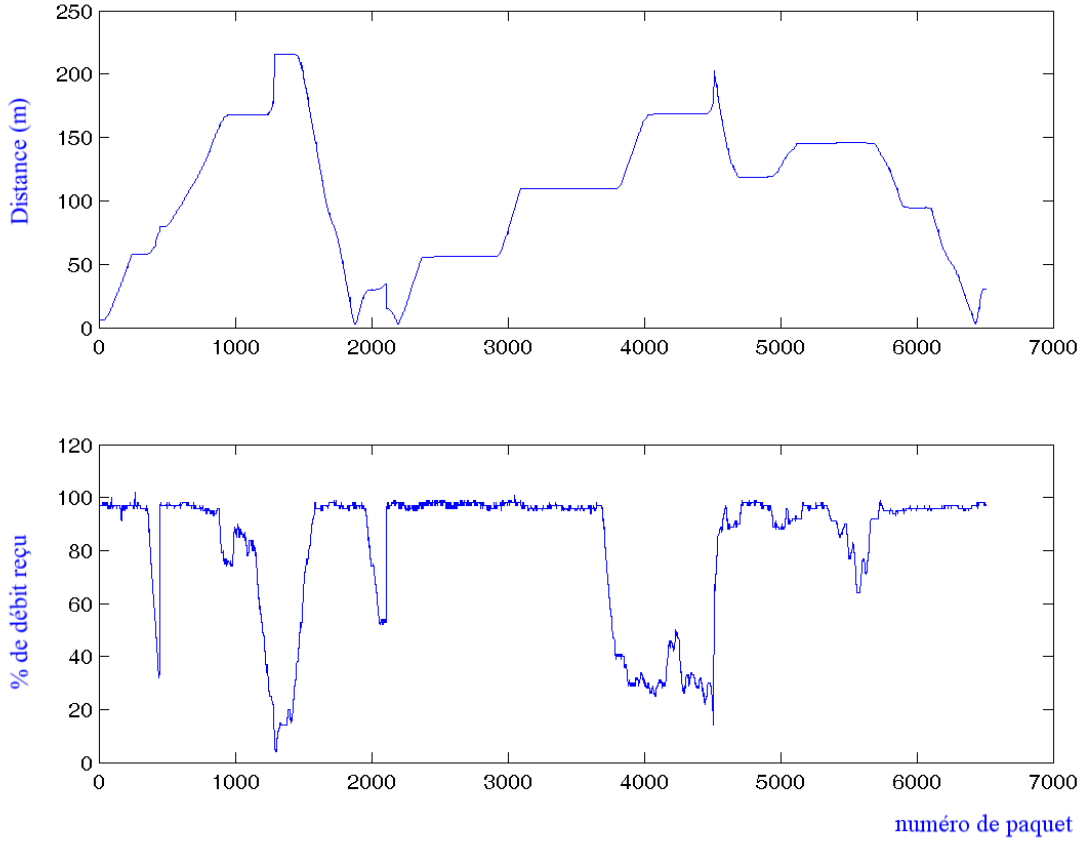

FIG. 3.20 – En haut, l'évolution de la distance entre les deux véhicules, et en bas le pourcentage de débit correspondant à cette distance

limiter cette expérimentation à une petite marge de vitesse. L'expérience est donc limitée à une variation de vitesse entre 0 et $35km/h$. L'évolution de cette vitesse est illustrée sur la figure 3.22

En examinant, sur la figure 3.23, la variation du débit reçu , nous remarquons que la communication reste impeccable et sans perte dans la plupart du temps de l'expérience. Toutefois, nous avons noté des chutes de débit qui atteignent 65% du débit utile. Afin de décrypter cette chute, nous examinons la variation du débit en fonction de la vitesse à travers l'histogramme des valeurs maximales et minimales de débit en fonction de cette vitesse. Cet histogramme est illustré sur la figure 3.24.

Nous remarquons sur la figure 3.24 que le débit de la communication chute aux alentours de la vitesse de 20 Km/h. Malgré cette chute, nous remarquons que la valeur maxi-

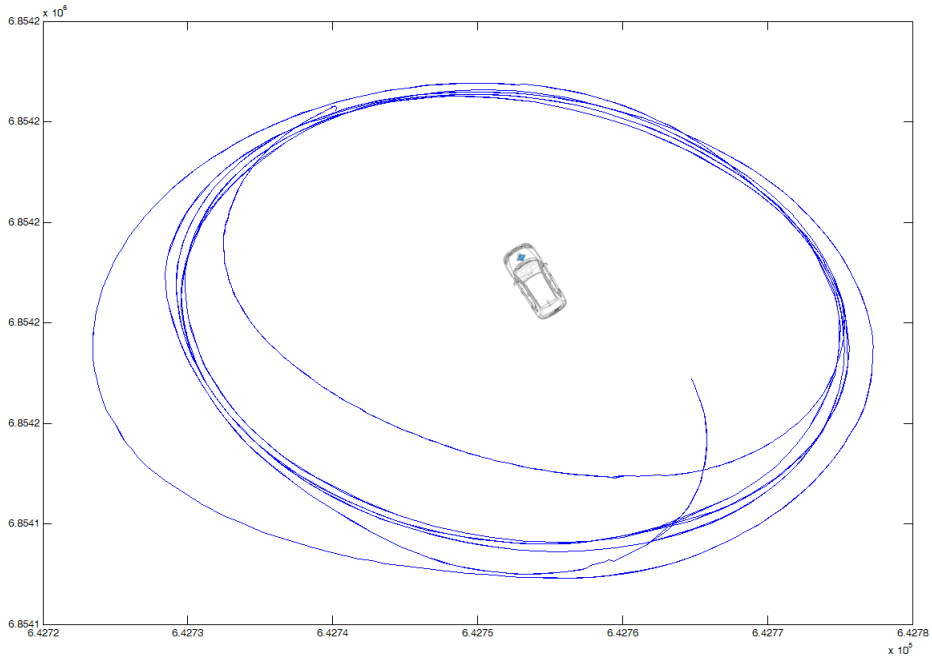

FIG. 3.21 – *Lara2* effectue une trajectoire circulaire autour de *Lara1*

male reste quand même parfaite dans toute la marge de la vitesse étudiée. Ceci prouve que, dans la marge de vitesse étudiée entre 0 et 35 Km/h, la dégradation du débit n'est pas due à la vitesse relative.

Cette expérience nous offre une autre possibilité qui consiste à étudier la distribution angulaire de la qualité du signal autour du véhicule statique. La figure 3.25 illustre une représentation du pourcentage de débit suivant l'angle du véhicule en mouvement circulaire.
Pareillement à l'étude sur la vitesse relative, nous remarquons que le maximum du pourcentage du débit reçu reste égal à 100% du débit total indépendamment de la direction autour du véhicule statique. comme montré sur la figure 3.25, nous ne négligeons pas les pertes entre les angles [-30 ° , 120 °] ; notons quand même que ces pertes se sont présentées seulement pendant un seul des tours effectués.

Afin de pouvoir monter en vitesse relative, nous avons répété un test pareil à celui de l'étude de la portée mais en se focalisant cette fois-ci sur la variation du débit échangé entre les véhicules en fonction de la variation de la vitesse relative. Même si cette étude par rapport à la vitesse est biaisée par le fait que le débit dépend à la fois de la distance

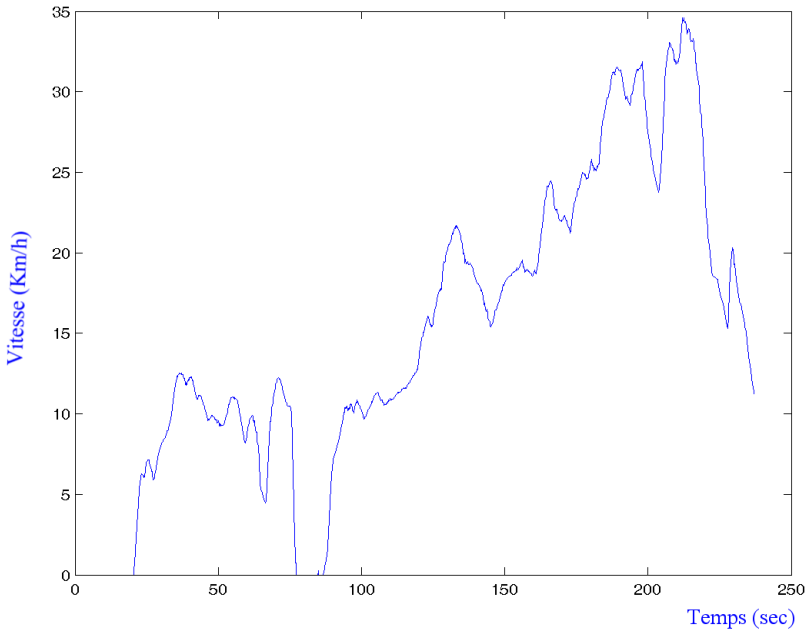

FIG. 3.22 – La variation de la vitesse en fonction du temps pendant l'expérience

et de la vitesse, nous avons essayé de garder un même profil de vitesse pour toutes les distances. L'histogramme de la figure 3.26 montre que les distances maximale, moyenne et minimale sont légèrement les mêmes pour toutes les vitesses étudiées.

La figure suivante 3.27 illustre l'histogramme du pourcentage de débit en fonction de la marge de distance étudiée entre 0 et 50 Km/h. Une fois de plus, le maximum de débit reste sur les 100% indépendamment de la vitesse du véhicule. Mais curieusement les minimums de débit croissent avec la vitesse du véhicule. Ceci peut être dû à ce qu'il existe beaucoup de paquets communiqués avec une grande distance et à des faibles vitesses. Ceci rend plus probable la perte des données et par la suite plus probable d'avoir des minimums de débit plus petits.

Dans la marge de la vitesse étudiée durant les deux tests, nous constatons que la vitesse relative ne constitue pas un handicap à la qualité de la communication. Cette conclusion se fonde sur la faiblesse des variations des valeurs maximales du débit pour les différentes valeurs de la vitesse relative.
Nous pensons qu'il faut étudier plus profondément cette question surtout si le schéma de communication proposé comporte des possibilités de communication entre les véhicules qui roulent en sens opposés sur les autoroutes par exemple. De telles configurations pré-

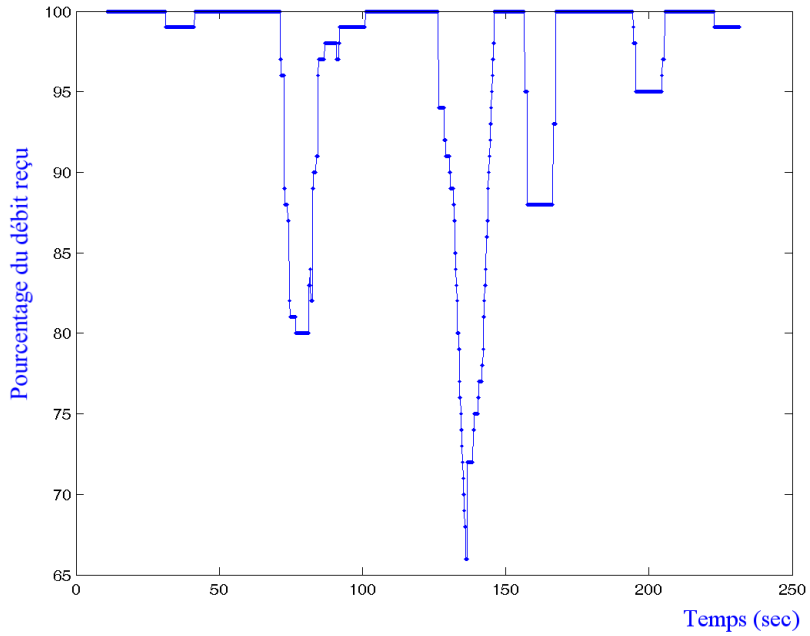

FIG. 3.23 – L'évolution du débit reçu durant l'expérience

sentent des vitesses relatives qui dépassent les $200km/h$ et nécessitent une étude plus détaillée.

3.3.5 La vitesse maximale des deux véhicules

A part les études sur les vitesses relatives, la vitesse absolue des véhicules a constitué l'un des thèmes que nous avons étudiés. Nous avons voulu nous rassurer qu'une vitesse élevée du véhicule ne perturbe pas le système de communication. Le test a été effectué sur l'autoroute Paris-Nantes. Durant ce test, la communication s'effectuait entre deux véhicules qui roulaient à $100km/h$ dans le même sens de déplacement. *Lara1* communiquait donc sa position et sa vitesse à *Lara2*.
Sur la figure 3.28, nous illustrons les vitesses de *Lara1* telles que reçues par *Lara2*. Nous constatons donc que la communication est bien possible entre les véhicules même à des vitesses supérieures à $100km/h$. Cette limite ne satisfait pas seulement le besoin de nos tests mais elle correspond également à la limitation de vitesse des véhicules sur les autoroutes françaises.

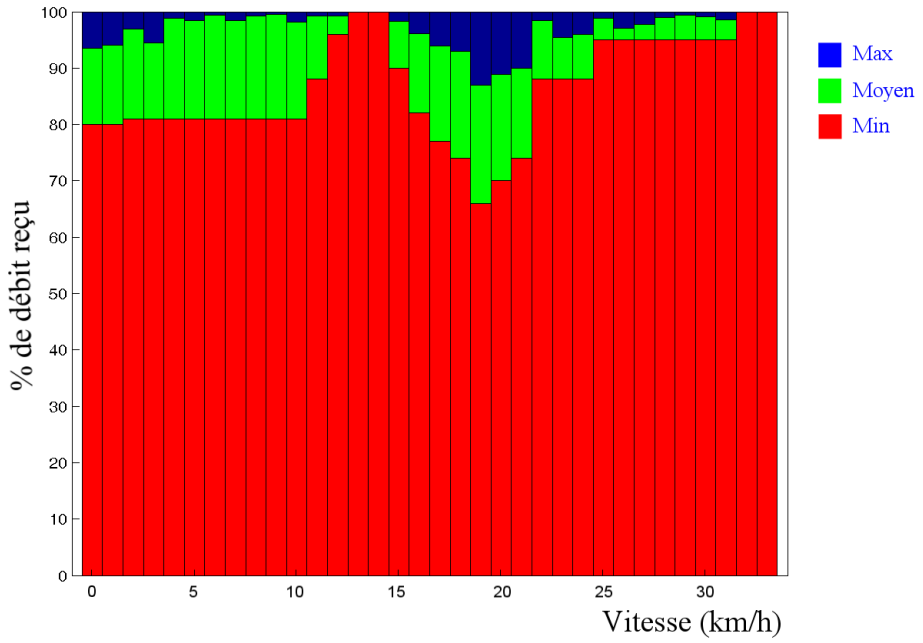

FIG. 3.24 – L'histogramme des valeurs minimales et maximales du débit de communication en fonction de la vitesse pendant l'expérience

En examinant les données GPS échangées, nous remarquons que les coupures de la réception de la vitesse présentées sur la figure 3.28 sont plutôt liées à la grande vitesse entre les véhicules et non à la vitesse excessive.

3.3.6 Le temps d'accrochage

Nous définissons le temps d'accrochage comme étant le temps durant lequel la communication reste possible pendant le dépassement d'un véhicule par l'autre. Ce temps est lié à la fois à la vitesse et à la distance entre les deux véhicules. Durant notre expérience, *Lara2* dépasse *Lara1* avec une vitesse relative qui atteint 100 km/h. Les trajectoires de ces deux véhicules sont illustrées sur la figure 3.29. Les évolutions de la vitesse et de la distance entre les deux véhicules est aussi illustrée sur la même figure. Dans ces conditions expérimentales, la communication entre les deux véhicules est établie pendant une période de 15 sec. Ce temps peut donner un ordre de grandeur de la quantité d'informations échangeables durant un dépassement et du temps d'anticipation d'un risque par

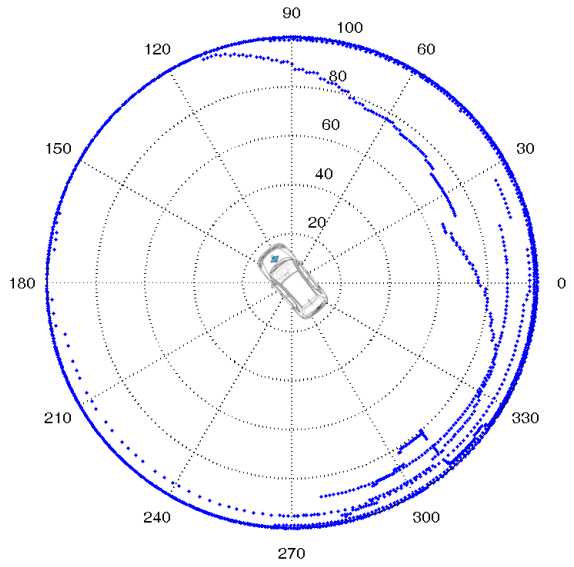

FIG. 3.25 – La distribution des points de communication autour de la position de *Lara1*

voie coopérative.

3.3.7 La latence

Nous définissons la latence entre les deux systèmes de communication comme le décalage temporel qui existe entre le moment où l'émetteur entame la communication et le temps où le récepteur intègre le message envoyé. Dans des applications temps réel, plus nous réduisons ce délai plus nous aurons des informations instantanées qui refléteraient la réalité du terrain.
Par rapport à la cause de la latence, nous obtenons plusieurs catégories de latence :

1. La latence informatique : c'est le temps pris par l'émetteur pour collecter les informations à communiquer et formuler le paquet à envoyer. Du côté de la réception, c'est le temps nécessaire au récepteur pour capter le paquet et décrypter les données incluses. La réduction de cette latence se passe par le biais de l'optimisation des processus informatiques.

2. La latence de propagation : c'est le temps de propagation dans le canal de transmission. Il dépend de la distance entre les deux véhicules. D'habitude, ce temps est négligé en comparaison avec les autres latences.

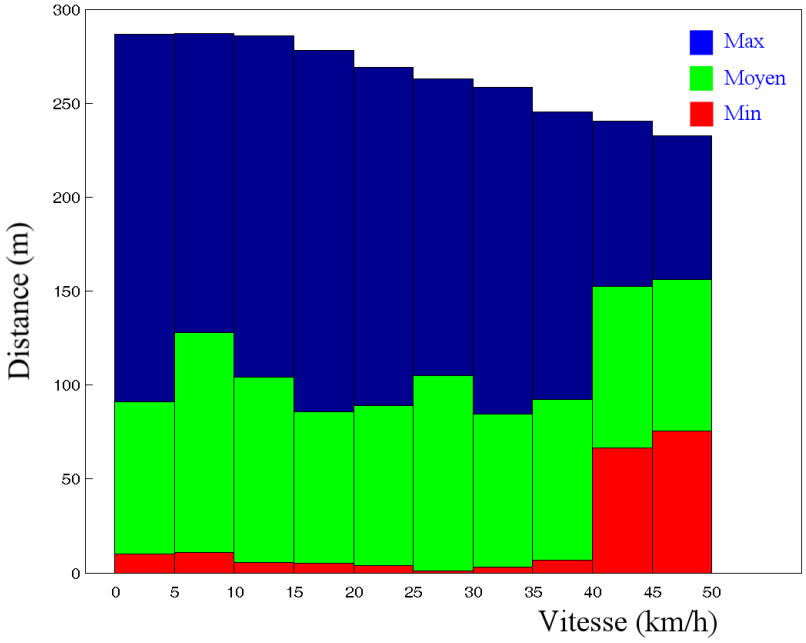

FIG. 3.26 – La distribution des distances minimale, moyenne et maximale pour différentes valeurs de la vitesse

3. La latence MAC : dans un schéma de technique à accès fixe, la latence est causée par la période de réservation des ressources de communication. Dans notre cas de figure, c'est la latence de la gestion de collision par les deux points d'accès Wifi, puisque le Wifi utilise un schéma d'accès aléatoire.
4. La latence de routage : c'est le temps d'acheminement des paquets vers sa destination finale. Ce temps est l'un des critères de performance de l'algorithme de routage. En effet, un algorithme de routage est plus performant s'il permet d'établir des chemins de communication qui produisent des latences plus réduites. Nous n'avons pas à nous soucier de cette latence dans notre système de communication puisque nous utilisons des communications directes peer to peer sans un système de routage.

Nous supposons donc que la latence dans notre système de communication est la somme de la latence informatique et de la latence MAC. Ces latences peuvent être réduites mais malheureusement ne peuvent pas être supprimées.
Une bonne estimation de ces latences permet de recaler les données reçues dans l'espace temporel et par la suite de prédire plus vraisemblablement le comportement des véhicules. Dans la suite de ce paragraphe, nous allons chercher à déterminer une valeur nominale de cette latence. Cette valeur sera par la suite intégrée dans notre algorithme de prédiction

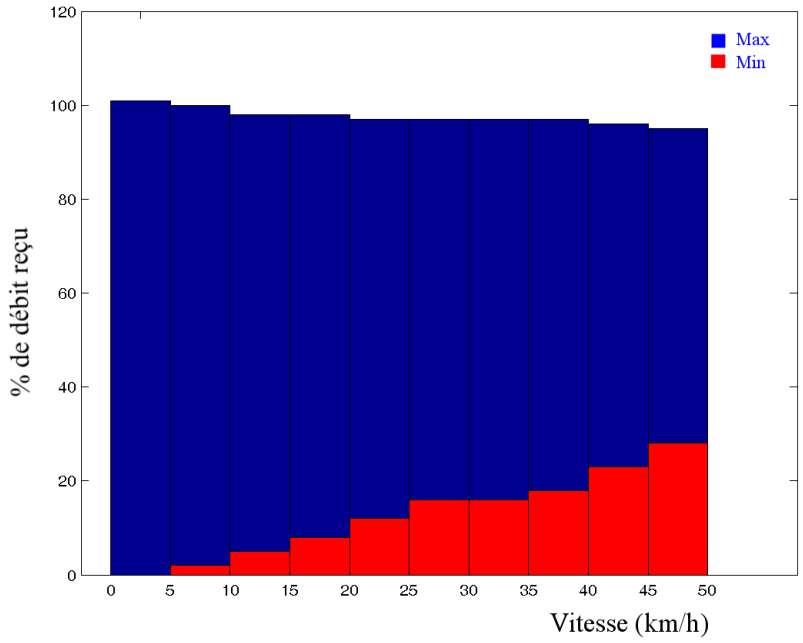

FIG. 3.27 – Le pourcentage de débit maximal et minimal en fonction de la vitesse

des trajectoires des véhicules.

3.3.7.1 Latence informatique

Afin de mesurer la latence dans la boucle informatique, nous avons besoin de la même base temporelle dans les processus d'émission et de réception. Pour avoir ceci, nous avons utilisé deux cartes Ethernet sur le même PC et nous les avons reliées par un câble filaire. Le processus d'émission utilise la première carte et le processus de réception utilise la seconde carte. De cette manière, nous réduisons le temps de propagation de l'onde et nous éliminons les latences induites par l'utilisation des cartes Wifi. La latence est donc calculée comme étant la différence entre le temps d'émission et de réception. La figure 3.30 montre cette latence informatique sur un ensemble de 12000 paquets. La valeur moyenne de cette latence est de l'ordre de 1.1 ms et la valeur maximale est 34 ms.

3.3.7.2 Latence mesurée par MAPS distribué

Une des nouvelles caractéristiques de la nouvelle version 3.0 de RTMAPS est l'ajout d'une architecture de client/serveur. Cette architecture consiste à déclarer l'un des ordinateurs comme le maître (ou Master) du réseau, les autres ordinateurs seront par la suite

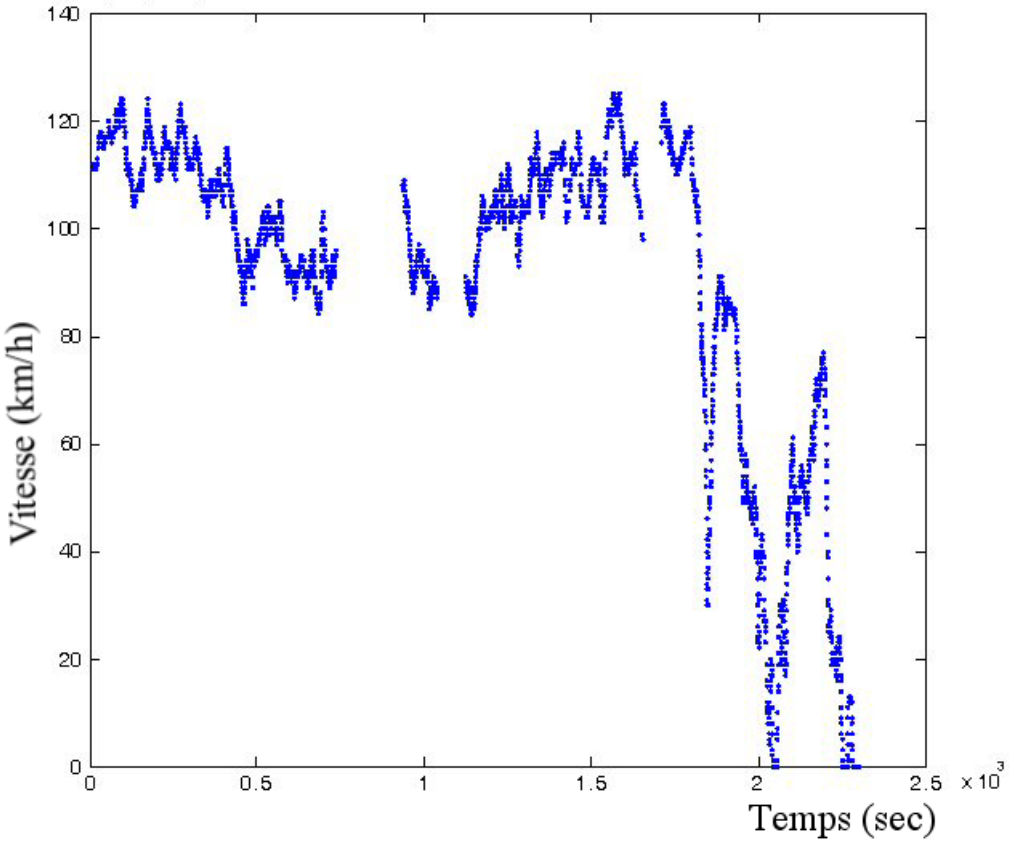

FIG. 3.28 – La vitesse de *Lara1* comme reçu par *Lara2*

des clients. La version distribuée permet ainsi de synchroniser l'horloge de tous les clients avec celle du maître qui se charge de commander chaque client à partir d'un "parseur". Pour effectuer la synchronisation, cette architecture distribuée utilise le protocole NTP[3] : le maître envoie un paquet daté avec le temps local de l'émetteur soit t_1. Le récepteur re-envoie le paquet en lui ajoutant son propre temps t_2. Ce même paquet est reçu par le maître à un temps t_3. Dans ce protocole de mesure, nous supposons que le temps de parcours est identique dans les deux sens de communication. Le temps de parcours entre les deux systèmes informatiques sera donc égal à :

$$T_{parcours} = \frac{t_3 - t_1}{2} \tag{3.4}$$

[3]Network Time Protocol

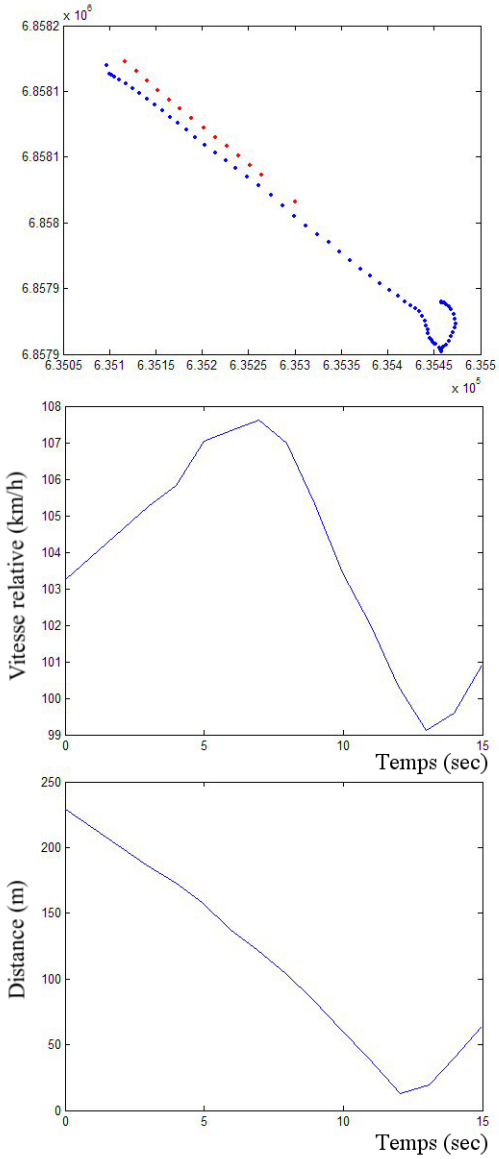

FIG. 3.29 – De haut en bas, la trajectoire des deux véhicules, la vitesse relative et la distance entre les deux véhicules

Le protocole NTP cherche donc à synchroniser les deux ordinateurs en appliquant un offset temporel au client. Cet offset est donné dans l'équation 3.5 :

$$\Delta t = t_2 - \frac{t_3 - t_1}{2} \tag{3.5}$$

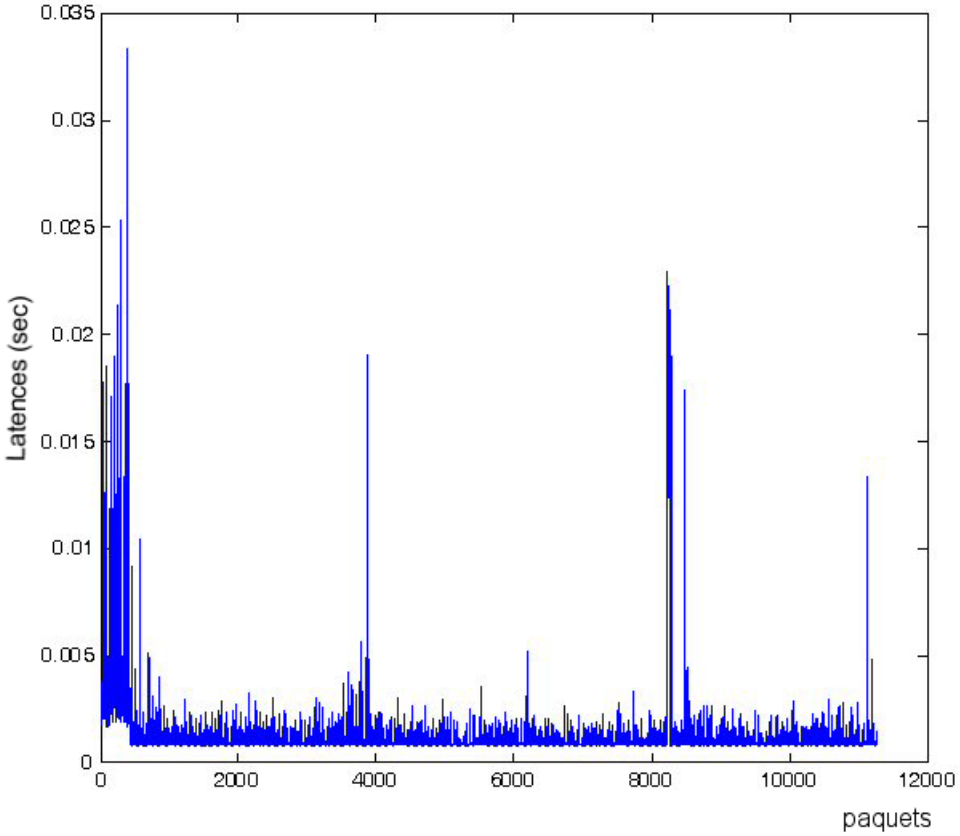

FIG. 3.30 – La latence informatique mesurée sur un ensemble de 12000 paquets.

Nous avons mesuré ces deux paramètres en utilisant notre système de communication. Sur la figure 3.31, nous montrons le temps de parcours entre les deux systèmes. Nous constatons ainsi que la valeur moyenne du temps de parcours est 200 ms. L'utilisation de notre système de communication complet durant cette expérience a fait que ce temps de parcours constitue la somme de la latence informatique et de la latence MAC.
Cependant, cette latence constitue la borne inférieure puisque les systèmes de communication sont disposés dans des conditions optimales (sans mouvement et à faible distance) durant l'expérience.

Sur la figure 3.32, nous illustrons la précision de la synchronisation dans cette même expérience. Cette erreur est de l'ordre de 15 μs avec une valeur maximale de 52 ms.

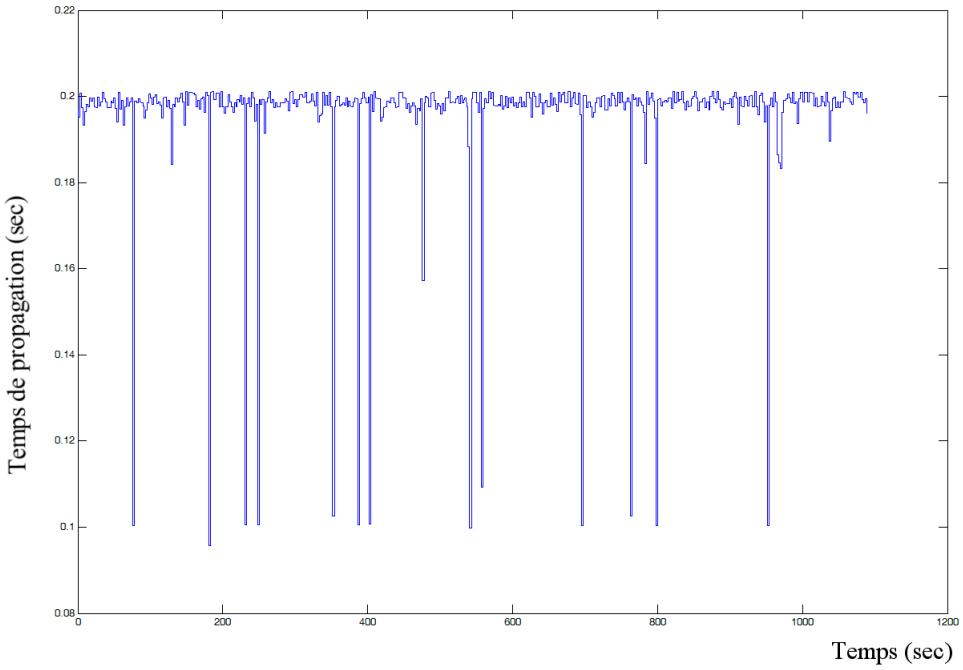

FIG. 3.31 – Le temps de propagation des paquets entre l'ordinateur maître et celui en esclave

Dans la suite de nos travaux, nous avons choisi de prendre la valeur de 200 ms comme la valeur nominale lors de la réception d'un paquet de données. L'estimation de cette latence nous permet d'augmenter la précision de nos informations. En effet, nous intégrons cette latence dans le système de prédiction de la trajectoire de chaque véhicule. Nous obtenons ainsi des trajectoires plus réalistes et plus adaptées à des applications temps réel.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre plateforme d'expérimentation pour la communication V2V. Nous avons ainsi présenté en détail l'architecture de notre flotte de véhicules intelligents, les outils de communication choisis et le logiciel de communication développé.
Le but des cet équipement est d'avoir une plateforme opérationnelle de véhicules communicants. La première étape était de caractériser les performances de ce système. Cette caractérisation se passe à travers une série de tests pour déterminer la portée de la com-

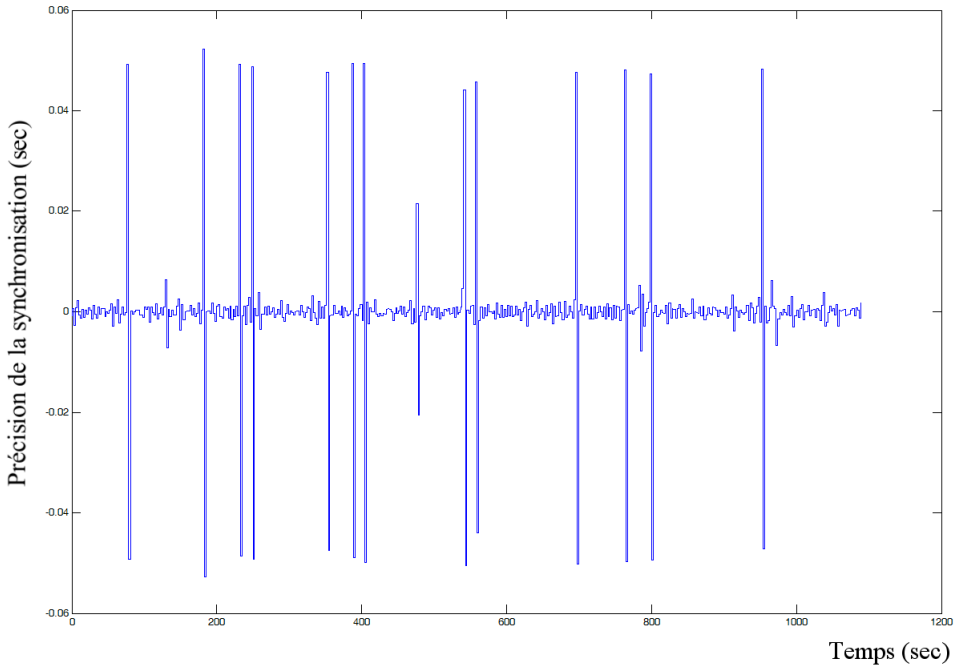

FIG. 3.32 – La précision de la synchronisation entre le maître et l'esclave

munication, le débit, la variation du débit avec la distance et la vitesse et enfin la latence de la communication entre les véhicules.
Durant ces tests, nous avons pu nous assurer de l'adéquation des performances de ce système de communication pour la conception de nouveaux services d'aide à la conduite au niveau de la portée et de la bande passante. Nous avons aussi déterminé les limites de ce système de communication. Nous avons constaté la sensibilité de ces outils de communication vis-à-vis de la configuration géométrique entre deux véhicules.
En concordance avec la constatation faite dans [8, 9], la géométrie de la route, les occultations et les positions relatives des véhicules constituent des facteurs importants qui influencent la qualité et la performance de la communication.
En se basant sur l'étude faite sur notre système de communications, nous étudierons dans les chapitres suivants quelques applications d'aide à la conduite dans lesquelles nous pensons que la communication V2V peut apporter un plus dans le domaine de la sécurité routière.
L'étude théorique de ces services sera suivie par des expérimentations effectuées avec nos véhicules communicants. Ces expérimentations servent à valider le concept de l'application et à mettre en œuvre les limitations et les difficultés d'une telle approche.

Bibliographie

[1] http ://www.arcos2004.com/

[2] Bruno STEUX, "RT Maps, un environnement logiciel dédié à la conception d'applications embarqués temps-réel. Utilisation pour la détection automatique de véhicules par fusion radar/vision". Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, soutenue le 02/12/2001.

[3] www.intempora.com

[4] www.winpcap.com

[5] H. Füssler, M. Torrent-Moreno, M. Transier, A. Festag, H. Hartenstein, "Thoughts on a Protocol Architecture for Vehicular Ad-Hoc Networks", for 2nd International Workshop in Intelligent Transportation (WIT 2005).

[6] Andreas Meier, "5.9GHz Dedicated Short Range Communication Design of the Vehicular Safety Communication Architecture", Master's Thesis, 1st August 2005, Daimler Chrysler

[7] Khaled, Y. Ducourthial, B. Shawky, M.,"IEEE 802.11 performances for inter-vehicle communication networks", Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005, On page(s) : 2925- 2929 Vol. 5

[8] Hao Wu , Mahesh Palekar , Richard Fujimoto , Randall Guensler , Michael Hunter , Jaesup Lee , Joonho Ko, "Empirical study of short range communications for vehicles", Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks, September 02-02, 2005, Cologne, Germany

[9] L.B. Michael, N.Akashi, N.Fujimoto, M.Nakagawa, K.Tokuda and K.Mizui, "DS/SS Inter-Vehicle Communication Experiments in 2.4 Ghz ISM band", IEEE International Conference on Intelligent Vehicles. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles Vol. 2.

Chapitre 4

Prévention du risque sur les intersections

FIG. 4.1 – Un carrefour urbain de type croix

Intersection, carrefour et croisement sont les mots utilisés pour désigner le lieu où plusieurs routes se croisent. Ce croisement de route désigne un croisement des trajectoires des véhicules provenant de chacune de ces routes. Cette intersection de trajectoires nécessite évidement une gestion de la priorité de passage. Diverses méthodes (ou stades) de gestion de passage ont été testés sur les carrefours. En l'absence de règle, les conducteurs étaient amenés à "négocier" leur carrefour avec les moyens disponibles. La plus simple des règles se résume par le règlement suivant : « Lorsque deux conducteurs abordent une intersection par des routes différentes, le conducteur venant par la gauche est tenu de céder le passage à l'autre conducteur... »*article R415-5 de la code de route*. Cette règle simple ne suffit pas évidement à assurer un ordre de passage sans conflit. En effet, cette règle amène à un blocage dans le cas d'une arrivée simultanée de véhicules par toutes les branches. Cette méthode est toujours utilisée sur de petits carrefours de faible densité de passage.
Les panneaux "stop" constituent une amélioration de cette règle en obligeant les véhicules à s'arrêter à l'approche de carrefour et de vérifier la possibilité de passage.
Les feux tricolores, qui occupent majoritairement les croisements de route, définissent une réparation de temps de passage entre les différentes branches aboutissant au carrefour. Même que l'utilisation de cette répartition temporelle réduit énormément les possibilités de collision et de conflit mais elle n'est pas optimale au niveau de la gestion du temps d'attente d'une permission de passage.

L'introduction de la communication dans le domaine de transport permet de repenser de nouveau le concept interactif de gestion de passage sur les croisements. Des concepts où la coopération permet de définir un ordre de passage optimal au sens de la suppression de risque de collision et de la gestion de temps de passage.

Dans ce chapitre, nous présenterons notre approche de prévention de risque de collision à l'approche des carrefours. Nous travaillerons donc sur un modèle de carrefour "brut"[1] c'est à dire sans prendre en compte une signalisation verticale pour la gestion de passage. Notre étude est réalisée ainsi afin de déterminer les apports (qu'offrent) et les contraintes (que subissent) les systèmes de prévention de collision à l'approche d'un croisement. L'objectif de notre système étant la définition du risque à l'approche de croisement. Pourtant, nous n'irons pas jusqu'à proposer des solutions face à ces situations de risque.

Nous commencerons ce chapitre par l'introduction du concept de carrefour dans les mondes urbain et rural. Nous exposerons ensuite les moyens actuels de gestion de priorité et de passage. Nous utiliserons par la suite des statistiques d'accidents et d'analyse de risque pour montrer que les carrefours sont toujours considérés comme des zones de risque élevé.
Ensuite, un tour d'horizon de l'existant dans le monde de l'ADAS permettra de constater les limites des systèmes actuels sur les intersections.
En se basant sur cette analyse détaillée, nous finirons le chapitre par une présentation de notre système de prévention de risque sur intersection basé sur la communication V2V.
Nous commencerons par une étude théorique sur la conception d'un système décisionnel de gestion de risque sur les intersections. Une deuxième partie sera consacrée à la description de notre système de prédiction de trajectoires des véhicules. Les cas étudiés seront ensuite présentés. Il s'agit de deux scénarios de croisement sur carrefour : 1) croisement en croix (où chaque véhicule continue sa trajectoire rectiligne), 2) croisement où l'un des véhicules tourne à gauche.

Nous essayerons de montrer la particularité de chacun de ces scénarios au niveau de la prédiction et de la gestion de risque. Durant ces tests qui englobent une grande partie des manœuvres dangereuses, l'information partagée n'est pas remontée au conducteur. Ceci permet de mesurer l'apport de la communication par rapport à d'autres systèmes d'évitement d'obstacles sans communications. Une étude hors-ligne en post-traitement sur ces informations échangées permet de montrer l'apport qu'a pu avoir un tel système sur les décisions du conducteur.
Le dernier paragraphe dans cette section sera consacré à l'étude des indices de risque existants. Cette étude est faite dans le but de définir un indice qui reflète le mieux le risque relatif à l'approche des croisements.

Nous terminons ce chapitre par un ensemble de conclusions et de recommandations qui permettent de mieux concevoir une application de gestion de risque sur intersections par le biais de la conduite coopérative.

[1] blind intersection

4.1 Accidentologie sur les intersections

Pour comprendre les origines du risque sur les intersections et ainsi mieux concevoir un système de gestion de ces risques, nous analysons en détail les intersections et leurs configurations.

4.1.1 Typologie des carrefours

Forme de croisement : suivant la forme des branches qui aboutissent au carrefour, la forme de la zone centrale et la priorité de passage nous pouvons définir trois classes de carrefour : un carrefour en croix, un carrefour giratoire et un rond-point. Un carrefour en croix, comme le montre la figure 4.2 (a), est un carrefour sans infrastructure spéciale au centre du croisement. Sur ce genre de carrefour, la trajectoire du véhicule peut ainsi être une trajectoire rectiligne. Tandis que sur un carrefour giratoire ou sur un rond point, et à cause de la partie centrale du carrefour (figure 4.2(b)), le véhicule est amené toujours à faire une courbe avant de reprendre sa trajectoire rectiligne. La différence entre un carrefour giratoire et un rond point est dans la définition des priorités de passage. La priorité appartient aux véhicules qui entrent dans un rond-point, tandis que sur un carrefour giratoire, la priorité appartient à ceux qui sont déjà engagés sur le carrefour.

Une comparaison entre ces types de croisements est faite dans [1]. Cette étude montre un avantage des carrefours giratoires par rapport aux carrefours en croix. En effet, la modification en carrefours giratoires entraîne une réduction de 35% de chocs et de 74% de blessés sur ces intersections après la modification.

En effet, la présence des carrefours giratoires permet à la fois de réduire les vitesses à l'approche des carrefours et de réduire les conflits sur les intersections. D'autre part, l'installation des carrefours giratoires est plus coûteuse et peut causer des accidents ou des dérapages dans le cas de conduite à grande vitesse : dans environ 40% des accidents sur un carrefour giratoire, l'accident est dû à une perte de contrôle du véhicule qui termine sa course dans la zone centrale du carrefour ([2]). Dans cette étude, nous allons nous focaliser sur les intersections en croix avec les différentes trajectoires possibles sur ces intersections.

Nombre de branchements : le branchement sur un carrefour est la voie par laquelle arrivent les véhicules. Plus le nombre de branchements est grand plus le flux de véhicules arrivant est grand et plus le conducteur doit être vigilant. Toutefois, le nombre de branchements donne un indice sur la densité du flux de véhicules arrivant sur le carrefour. Le stress et le risque sur un carrefour de type "Place de l'Étoile" à Paris est bien sûr plus important que sur un simple carrefour à quatre branchements.

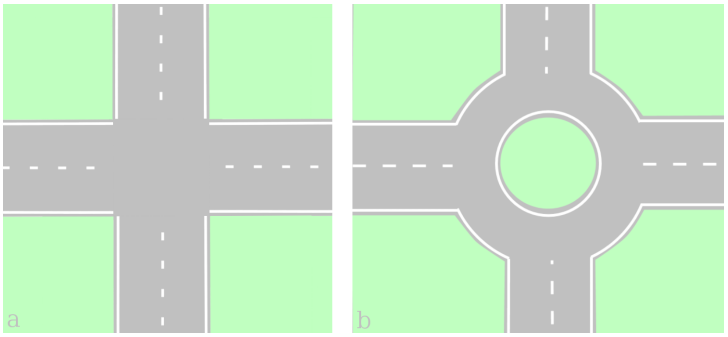

FIG. 4.2 – temp : a. carrefour en croix ; b. carrefour giratoire

Nombre de voies sur les branchements : le nombre de voies donne aussi une information sur la densité et sur les trajectoires possibles des autres véhicules.

Type de signalisation : feu, stop ou intersection brut : la signalisation est conçue dans le but d'imposer un code commun à tous les conducteurs. Le feu tricolore organise le passage en partageant d'une façon très stricte le temps entre les différentes branches. Le stop (ou la signalétique indiquant la cessation de passage) permet d'optimiser le temps d'attente du conducteur tout en l'obligeant à s'arrêter sur l'intersection et de vérifier la possibilité de passage sans risque. Les intersections brutes (sans signalisations) peuvent exister toujours dans les zones rurales à faible fréquentation de véhicules et dans les quartiers résidentiels avec une priorité à droite.

Vitesse limite sur les voies : la vitesse limite sur les routes amenant à un carrefour donne une idée sur les vitesses des véhicules. Ceci permet par la suite de prédire l'impact et la dangerosité d'un choc entre-véhicules. Des études récentes estiment que des vitesses limites variables sur les branches peuvent amener à une amélioration de la sécurité routière [3].

Angle et champ de visibilité : le manque de visibilité est l'handicap majeur à la fois pour le conducteur et pour les ADAS basés sur la perception à l'approche d'un carrefour. Un carrefour est a priori une zone où on ne voit pas forcément les véhicules sur les autres branches d'où la nécessité de plus de vigilance de la part conducteur. La visibilité sur le carrefour est aussi réduite par la présence de structures urbaines, de végétation, des véhicules statiques, des véhicules en mouvement, etc. Le manque de visibilité demeure l'une des sources essentielles du stress pour le conducteur et par conséquent de risque d'accident. La figure 4.3 illustre un cas simple de la relation de visibilité sur un carrefour en croix à quatre branchements et l'équation 4.1 détermine

la profondeur géométrique de visibilité dans ce cas simple.

$$L_v = \frac{(\frac{L_c}{2} + L_t)(D + \frac{L_c}{2})}{(D - L_c - L_t)} \tag{4.1}$$

Où L_c étant la largeur de la voie, D est la distance du centre du carrefour et L_t est la largeur du trottoir.
Les deux véhicules sont supposés rouler au milieu des voies. D'après cette formule si la largeur de la voie est de 3.5 m, celle du trottoir de 1.5 m, et si le véhicule est à 10 m du milieu du carrefour, nous serons capables de voir à 7.6 m de profondeur par rapport à l'axe de notre véhicule.

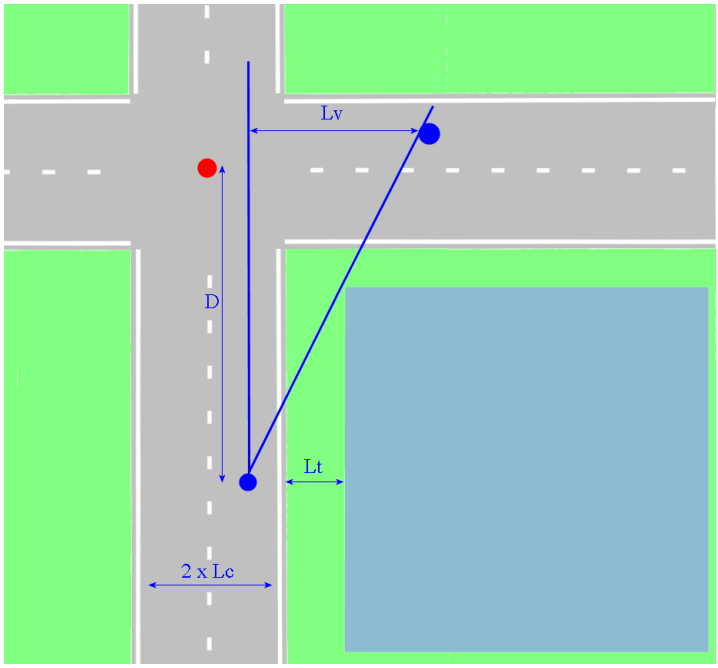

FIG. 4.3 – La visibilité sur carrefour

Zone de conflit : On définit la zone de conflit du carrefour comme la zone centrale du carrefour où les différentes trajectoires se coupent. L'analyse du risque se fait essentiellement dans cette zone. Statistiquement, certaines parties de cette zone peuvent être considérées à haut risque.

4.1.2 Causes d'accidents sur les intersections

En analysant les causes des accidents sur les intersections, nous remarquons que le manque d'information et/ou d'attention du conducteur demeurent les causes primordiales

d'accidents.
Selon une étude faite par la NTHSA[2], les causes liées à une manque d'information regroupées constituent statistiquement 75% de raisons déclarées par les conducteurs.

Ce manque d'information provient de la topologie même du carrefour où la visibilité entre les véhicules n'est possible qu'à partir d'une certaine distance de celui-ci.

Selon les études de *Rataj et al* [4], le stress constitue le premier facteur d'accidents sur les intersections. Cette vision du stress comme un facteur de risque sur les intersections rejoint les études de la NHTSA puisque le manque d'information constitue bien un préliminaire du stress.

Les conducteurs âgés ont plus d'accidents dans une intersection, lors d'un changement de direction ou dans une insertion dans la circulation. Ces situations correspondent en effet à des moments qui nécessitent une prise de décision rapide et complexe.
Selon des données britanniques, les seniors impliqués dans les accidents de carrefour forment 34 % des accidents sur les intersections en T, 14,6 % sur les intersections en croix et 4,8 % sur les giratoires.
Pour les deux premiers types d'intersection, l'usager doit s'insérer dans un ou plusieurs flux de trafic alors que sur un giratoire, le trafic ne vient que d'une seule direction. Par ailleurs, les accidents des seniors sur carrefour sont plus importants en rase campagne qu'en zone urbaine, probablement en raison des vitesses plus élevées. Le risque d'accident lié aux carrefours augmente dans quatre circonstances : en rase campagne, sur les voies prioritaires, les tourne-à-gauche et les demi-tours.

Le pouvoir informatif de la communication peut donc jouer un rôle important dans la prévention de risque et la diminution des possibilités de chocs sur les intersections. En effet, la simple connaissance de la position et de la vitesse des autres véhicules qui attaquent le même carrefour peut amener à réduire le stress à l'approche de ce carrefour et par la suite à réduire le risque de collision entre ces véhicules.

4.1.3 Statistiques d'accidents

Les statistiques d'accident montrent que les intersections sont toujours considérées comme des zones à risque élevé. Selon une étude effectuée au Japon en 1991, plus de 60% des accidents et 43% des morts sur les routes locales avaient eu lieu sur (ou à proximité) des intersections [5]. Une étude plus récente [6] en 2000 montre que 780 mille accidents sur les intersections ont lieu chaque année seulement au Japon. En d'autres termes un accident toutes les 10 secondes sur intersections. 49.6% de ces accidents sont déclarés comme des chocs frontaux (head on collisions).

[2]National Highway Traffic Safety Administration

En Europe, les statistiques montrent qu'en général plus d'un tiers des accidents sérieux et fatals se passent sur les intersections [7]. Selon [8], le pourcentage monte à 50% aux Pays Bas. Tandis qu'en Allemagne, 35% des accidents ont lieu sur les intersections [9, 10]. Et aux États unis, les collisions sur intersection constituent approximativement 43% de toutes les collisions [11].

Dans le projet californien PATH, les statistiques chiffrent encore une fois le risque des accidents sur les carrefours : 27.3% des accidents enregistrés par la police ont lieu sur les carrefourss soit 1.72 Million de chocs, 9000 fatalités par an, 25% des fatalités sur les routes et 50% des blessés sur les routes (à peu près 1.5 millions de blessés) [12].

Par rapport aux types de manœuvre effectuée, une étude statistique des accidents sur les intersections faite aux Etats Unis par la NHTSA [13] montre que :

- 23% des accidents sont dus à des manœvres de tourner à gauche dont curieusement 87.1% se passent sur des intersections contrôlées par des feux tricolores.
- 30.2% pour des trajectoires perpendiculaires avec une mauvaise entrée sur le carrefour.
- 43.9% pour des trajectoires perpendiculaires avec une violation du code de la route.
- 2.1% pour des entrées prématurées sur les intersections avec violation du code de la route.

Et Selon une autre étude faite dans le cadre du projet PATH, les accidents sont répartis dans l'ordre suivant [12] :

- Passage droit 36.6%
- Véhicule tournant à gauche avec un véhicule venant d'en face 27.3%
- Véhicule tournant à droite avec un véhicule venant de la voie latérale 15.9%
- Véhicule tournant à gauche avec un véhicule arrivant de la même direction 4.7%
- Véhicule tournant à droite avec un véhicule arrivant de la même direction 4.7%

Nous constatons donc que les trois premières manœuvres regroupent plus que 70% des accidents. Pour cette raison, nous avons choisi d'étudier ces configuations dans nos tests. D'autre part, si nous examinons les accidents selon le type de signalisation sur le carrefour, nous obtenons que :

- 41.6% des accidents ont lieu sur les carrefours avec des feux tricolores
- 36.6% des accidents ont lieu sur des carrefours avec des panneaux de Stop
- 22.1% des accidents sur des carrefours sans signalisation

Tout en prenant en compte que le pourcentage élevé d'accident sur les carrefours à feux tricolores est dû en partie au fait que les carrefours à feux sont les plus abondants ; nous mettons l'accent sur le fait que l'utilisation des feux tricolores ne constitue pas une solution satisfaisante pour la gestion de passage sur les croisements.

Enfin, nous reportons quand même quelques statistiques positifs des pays qui gèrent convenablement leur trafic routier comme la Suède où les accidents sont de 0.7 accident

par an sur les intersections [3].

4.1.4 Systèmes d'assistance actuels sur intersections

Les systèmes actuels d'assistance à la conduite à l'approche des carrefours se basent actuellement sur des capteurs de perception comme la vision, le radar et la télémétrie laser. Même si ces trois capteurs sont utilisés avec efficacité dans la plupart des ADAS actuels, ils montrent néanmoins des limitations sur les croisements.
En effet, tout comme le système visuel humain, ces capteurs ont des limitations au niveau de leur portée, notamment au regard des problèmes de la détection des obstacles et de la route. La valeur ajoutée de ce genre de capteurs se limite à la détection et la quantification des paramètres d'un véhicule une fois "perçu" et détecté.
Dans le projet européen *InterSafe*[7], les exigences sur les capteurs de perception sur intersection ont été définies : un champ de perception de l'ordre de 125° de part et d'autre de l'axe principale du véhicule, une portée minimale de 200 m et ce, afin de pouvoir couvrir une région intéressante autour du véhicule.
Pour répondre à ce type d'exigences, la communication fournit une alternative intéressante qui permet d'assurer un flot rapide d'informations sûres concernant les véhicules qui abordent un croisement.

4.2 Conception du système de prévention de risque

Comme nous venons de voir dans les paragraphes précédents, aucun système existant ne peut prétendre fournir une solution complète pour la gestion du risque à l'approche des carrefours. Dans ce qui suit, nous allons présenter notre approche basée uniquement sur la communication inter-véhicule. Dans cette étude, nous négligeons intentionnellement l'utilisation de tout autre capteur extéroceptif embarqué sur le véhicule ainsi que les informations issues de la base de données cartographique.
L'utilisation de la communication associée seulement aux capteurs proprioceptifs embarqués dans le véhicule (dans notre cas un récepteur GPS pour la position et un odomètre pour la vitesse) a pour objectif de mesurer le seul apport de la communication dans un tel système. Nous tenons à préciser que la conception d'un système fonctionnel de gestion de risque sur carrefours doit exploiter naturellement des informations fournies à la fois par les capteurs extéroceptifs et par les bases de navigation cartographiques.

Notre objectif est de fournir, dans chaque véhicule, un système de prévention de collision avec les autres véhicules sur intersection. Ainsi, chaque véhicule récupère, par voie hertzienne, des informations sur la position et la vitesse des autres véhicules présents sur toutes les voies "aboutissant" au carrefour. Cette connaissance permet d'élaborer une

carte instantanée embarquée sur laquelle figurent les paramètres des véhicules environnants. Grâce à cette carte et des algorithmes adéquats, nous pourrons calculer le risque instantané lors de l'approche d'une intersection.

Afin d'étudier l'apport de ce système au niveau de la sécurité, il faudra comparer une situation d'approche d'une intersection sans connaissance du risque avec la même situation en présence d'informations envoyées par communication et analysées à bord du véhicule. Pour cela, lors de nos campagnes d'essais, nous étudierons le comportement du conducteur s'approchant d'une intersection en l'absence de ces informations. Cette approche nous permet de comparer les temps de réaction du conducteur sans connaissance du risque encouru par rapport aux moments où le système V2V arrive à repérer ce risque. Cette comparaison ne prendra pas en compte l'impact de l'arrivée de cette information sur le conducteur. Néanmoins, l'impact d'un système coopératif sur le comportement du conducteur mérite une étude psychologique et sociologique détaillée qui ne relève pas du cadre de cette étude.

La figure 4.4 fournit un organigramme résumant notre démarche de prévention de risque et les paragraphes suivants en détaillent le contenu.

4.2.1 Détection des véhicules

Comme expliqué dans le chapitre 3, la détection des véhicules dans un système V2V coopératif est basée sur un échange actif entre les différentes véhicules. Dans la suite, nous supposons que tous les véhicules sont "visibles" par la communication. Cette hypothèse n'étant pas satisfaite qu'après une forte intégration de cette technologie sur les véhicules, nous supposons que ce système est opérationnel dans un premier temps entre les véhicules équipés seulement.
La zone de visibilité (ou de couverture) du système dépend donc de la portée des outils de communication utilisés. Elle sera aussi contrainte par la configuration géométrique du carrefour qui, a priori, perturbe la vision directe entre les véhicules et par la suite dégrade la qualité du signal de communication.
La notion de la portée sur le carrefour est importante puisqu'elle définit le temps d'accrochage (ou de début de la communication effective entre les deux véhicules) avant d'arriver sur la zone de conflit du carrefour. L'importance de cette notion provient du fait que ce temps correspond au temps total de la gestion du risque de collision si un tel risque existe. Plus tôt nous aurons l'information, mieux nous pourrons anticiper le risque.
Pour ces raisons, nous mesurons la portée de la communication sur chaque site d'expérimentation. Nous présenterons dans la suite cette mesure sur quelques sites de natures variées.

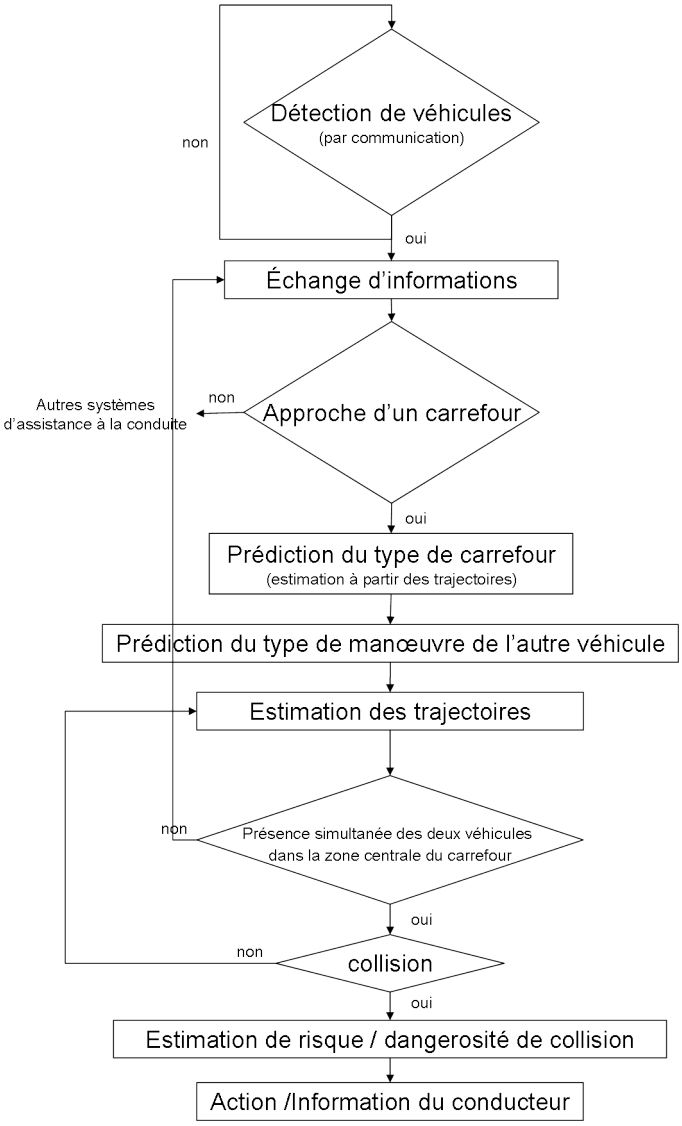

FIG. 4.4 – Organigramme de la gestion des intersections

Dans le site Luxembourg, typiquement urbain, la portée est mesurée entre deux véhicules approchant un carrefour autour d'un bâtiment qui fait le coin de la rue. La distance de début de la communication est calculée à partir de l'échange des positions GPS entre les deux véhicules. Ne connaissant pas les distances réelles respectives entre chaque véhicule et le carrefour, le calcul est fait en post-traitement après la connaissance du centre du carrefour abordé. ainsi, la distance au carrefour lors de l'accrochage est de 45 mètres sur ce site (figure 4.5). Cette distance correspond en temps à 4 sec pour arriver à la zone

de conflit du carrefour si la vitesse du véhicule est de 40 km/h. Ce temps reste supérieur au temps de réaction du conducteur qui est estimé à 2 sec (une seconde pour la réaction du conducteur et une seconde pour l'action sur le véhicule). Ceci signifie que la communication peut fournir les informations assez tôt pour jouer un rôle d'anticipation de risque sur le carrefour. La limite de 2 sec est atteinte avec une vitesse de 80 km/h qui est une vitesse excessivement élevée dans la ville. En plus et selon l'équation 4.1, la profondeur de visibilité dans la rue perpendiculaire calculée à partir du calcul purement géométrique est de 4.2 m. Les 45 mètres constituent donc une bonne amélioration qui permet d'étendre la visibilité du conducteur et par la suite de mieux anticiper le risque.

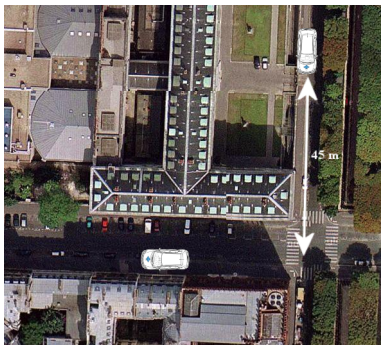

FIG. 4.5 – La mesure de la distance de visibilité par communication sur croisement

Le site Invalides constitue un autre site urbain plus dégagé. Cette caractéristique favorise la possibilité de communication. Ainsi nous avons constaté que les distances entre les positions de début de la communication et le point de rencontre des trajectoires sont de l'ordre de 76 et 90 mètres.
En conclusion, même si la portée constatée sur nos sites d'expérimentations n'arrive pas à la portée recommandée par le projet *Intersafe* [7], son ordre de grandeur laisse néanmoins des espoirs quant aux bénéfices de l'utilisation d'une telle technologie dans la prévention de risque sur croisement.

4.2.2 Les paquets d'informations échangées

Une fois les véhicules détectés, un échange d'informations permet de constituer la carte des véhicules environnants. Dans notre système, nous distinguons deux genres d'informations :

- Les informations de base : ce sont les informations de positions fournies par le récepteur GPS et l'information de la vitesse longitudinale donnée sur le bus CAN du véhicule. En l'absence de ces informations, il serait impossible de constituer notre carte.

- Les informations complémentaires : tels que l'angle de volant, l'état de freinage et les feux clignotants. Ces informations fournissent des indices qui permettent d'enrichir notre carte et par la suite de mieux prédire le comportement des autres véhicules.

L'échange de ces informations dure pendant toute la durée de la communication avant, pendant et après la passage sur carrefour. Chaque envoi de nouvelles données permet de mettre à jour les connaissances sur les autres véhicules et ensuite de corriger notre modèle de prédiction des trajectoires comme expliqué dans la suite.

4.2.3 Détection de l'approche de croisement

En l'absence des informations cartographiques, la première information extraite de la carte dynamique des véhicules doit nous aider à décider si nous sommes à l'approche d'un carrefour ou pas.
Selon la direction et le sens de l'angle α entre les deux vecteurs vitesses des véhicules, trois classes de trajectoires se présentent et la figure 4.6 illustre sur un organigramme ces trois cas de figures.

- si l'angle α est petit : cela veut dire que les trajectoires sont parallèles, c'est à dire que les deux véhicules sont sur la même route (problème d'insertion ou de gestion de distance) ou bien sur des routes parallèles (sans risque de collision). Dans ces deux cas de figure, nous jugeons que nous ne sommes pas sur un croisement et par la suite le traitement doit se faire sur la base d'un système de gestion de risque différent.
- si l'angle α est aux alentours de 180° : c'est un véhicule qui arrive en face sur la voie opposée. Cette information ne suffit pas pour trancher si nous arrivons ou non sur une intersection. Dans tous les cas et même en l'existence d'une intersection, la situation reste sans risque tant que les deux véhicules continuent leurs chemins rectilignes sans tourner et par la suite les deux trajectoires ne doivent pas se croiser. Toutefois, nous devons rester vigilants sur toute modification de trajectoire de l'un des deux véhicules. Dans ce cas, nous retombons, selon le sens de changement de d'angle du volant du véhicule, dans le cas du scénario où l'un des véhicules essaie de tourner et rejoindre la voie latérale gauche. Ce cas de figure sera étudié dans la suite 4.3.2.
- si l'angle α entre les deux vecteurs vitesse est aux alentours de 90° : c'est à dire que les deux trajectoires ont une forte probabilité de se recouper. Dans ce cas, nous estimons que les deux véhicules vont bientôt arriver sur une intersection. La détection d'un carrefour déclenchera le processus d'estimation de risque sur croisement. En effet, cette estimation primitive d'une approche de carrefour sera validée par une étape plus robuste de prédiction des trajectoires des deux véhicules.

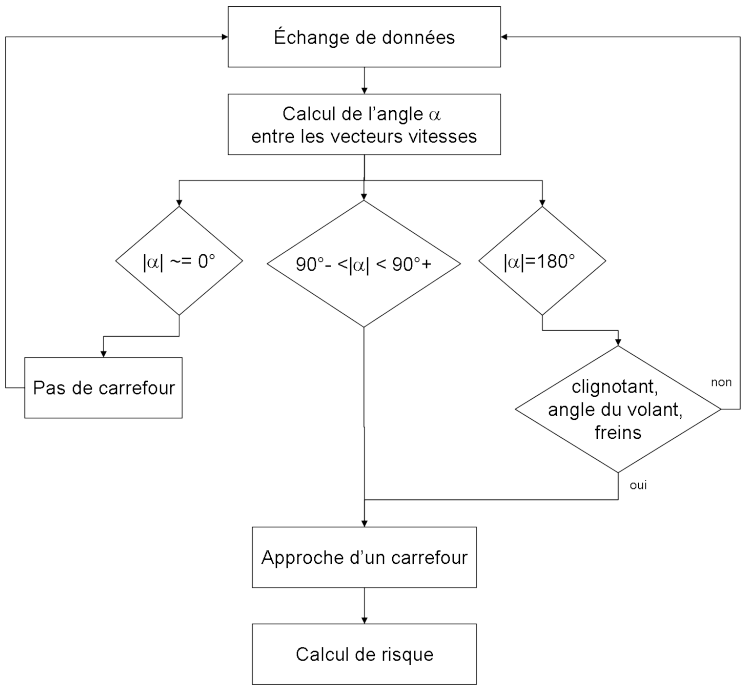

FIG. 4.6 – La détection de l'approche d'un carrefour à partir des trajectoires des véhicules

4.2.4 Prédiction des trajectoires

La prédiction des trajectoires des véhicules constituent une phase importante et sensible de notre système. Cette phase est très importante car l'algorithme global d'estimation de risque dépend de sa robustesse. Elle est d'autant plus sensible qu'elle se fait sur la base d'un modèle de mouvement du véhicule. Le réalisme et l'exactitude de la trajectoire prédite sont directement liés à la précision et la fidélité du modèle choisi.

En réalité, la prédiction est indispensable dans notre système pour deux raisons différentes :

- La limitation de la fréquence d'échange de données : il existe toujours une borne supérieure de la fréquence d'échange des informations entre les véhicules. Cet échange ne peut jamais se faire d'une manière continue. En effet, la fréquence d'échange dépend de la capacité du canal, du nombre de véhicules communicant et de la taille de l'information communiquée. En conséquence, un véhicule doit avoir recours à un système de prédiction des trajectoires qui permet d'estimer la position instantanée de chaque véhicule par interpolation entre deux échanges de données successifs.
- L'estimation du mouvement futur des véhicules : l'estimation du risque de collision se base sur une prédiction de la trajectoire future du véhicule dans un horizon temporel

donné. De ce fait, la prédiction doit se baser sur l'historique de déplacement du véhicule et sur ses paramètres dynamiques actuels.

Pratiquement, la prédiction peut avoir deux schémas différents selon la nature des données communiquées :

- Prédiction locale de la trajectoire : chaque véhicule se charge de calculer sa propre trajectoire localement et communique ensuite aux véhicules voisins ses positions futures dans un espace spatio-temporel donné. Cette approche a l'avantage de réduire le temps de calcul à une seule prédiction par véhicule. Pourtant, la taille de l'information communiquée peut être assez importante selon la dimension de l'horizon étudié et la résolution de la trajectoire communiquée.
- Prédiction distribuée de la trajectoire : dans ce cas, les véhicules échangent leurs positions et leurs vitesses respectives. Chaque véhicule se charge donc de calculer sa propre trajectoire et la trajectoire des autres véhicules. Cette méthode implique une répétition du calcul sur chaque véhicule mais limite la quantité d'information communiquée.

Durant nos tests, nous avons opté pour la deuxième approche pour les raisons suivantes :

- la souplesse au niveau du choix de l'horizon à étudier sur chaque véhicule.
- la maîtrise des erreurs dues aux retards de calcul des trajectoires.
- la liberté de chaque véhicule de limiter la prédiction des trajectoires à un sous-ensemble de véhicules jugés à risque vis-à-vis des actions que le véhicule prévoit effectuer.

D'autre part, et indépendamment du choix du mode de communication, la prédiction se fait sur la base d'un modèle de mouvement du véhicule. Ce modèle est basé sur l'une des approches suivantes (ou parfois d'un mélange des deux) :

- Une prédiction selon un modèle géométrique de déplacement du véhicule (par des fonctions splines ou des fonctions polynomiales, des clothoïdes par exemple).
- Une prédiction selon un modèle de mouvement dynamique du véhicule (comme le modèle bicyclette ou tricyle par exemple).

Le choix d'un modèle pour notre déplacement est régi par deux contraintes d'ordre pratique :

- L'aspect temps réel de nos applications nous obligent à chercher un compromis entre le réalisme du modèle du véhicule et la rapidité des calculs effectués.
- Le modèle choisi serait limité aux paramètres disponibles via les capteurs embarqués sur les véhicules, à savoir la position et la vitesse.

Pour satisfaire toutes ces contraintes, et en vue de la diversité des configurations, nous allons essayer d'étudier chaque manœuvre à part et de proposer localement un modèle simple et réaliste pour décrire ces manœuvres. Cette modélisation sera présentée par la suite au moment de l'étude de chaque manœuvre.

4.2.5 Les erreurs sur la prédiction des trajectoires

A côté de l'exactitude du modèle de déplacement choisi, la trajectoire prédite comprend deux sortes d'erreurs ou d'incertitudes :

- L'erreur sur la position GPS : les positions délivrées par un récepteur GPS dépendent de l'algorithme de positionnement utilisé dans le récepteur et de la qualité des signaux reçus. Par conséquent, une marge d'erreur sera toujours induite dans ce calcul. Pour ces raisons, il est plutôt judicieux de parler d'une probabilité de présence dans une zone autour de la position délivrée par le GPS que de parler d'une position ponctuelle. Dans nos études, nous représentons la position du véhicule par une ellipse d'incertitude ou de probabilité de positions. Les dimensions de deux axes de l'ellipse sont calculées à partir de l'erreur de positionnement induite par le récepteur. Et de ce fait, les dimensions du véhicule seront étendues aux bordures de cette ellipse.
  Par ailleurs, la collision entre les véhicules est calculée à partir de la mesure de la distance entre leurs positions respectives. Ceci revient dans notre cas à détecter une collision entre les deux ellipses représentatives des deux véhicules. Un calcul analytique de l'intersection de deux ellipses représente un coût calculatoire considérable. C'est pour cela que nous sommes inspirés des méthodes astucieuses employées classiquement en infographie 3D pour la détection de collision d'objets 3D maillés.
  Ainsi, nous modélisons chaque ellipse par un ensemble de cercles centrés sur le grand axe de l'ellipse. La détection de collision entre deux ellipses revient donc à l'existence d'au moins une collision entre cercles appartenant aux deux ellipses.
  L'intersection des cercles est facilement calculable puisqu'il suffit de calculer la distance entre les deux cercles et de la comparer à la somme des deux rayons. La modélisation de chaque ellipse est illustrée sur la figure 4.7.

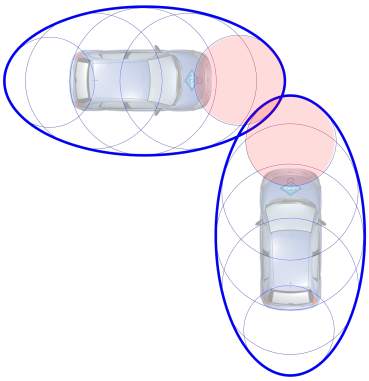

FIG. 4.7 – La détection d'un choc entre deux véhicules à travers l'intersection de deux cercles du modèle

– L'erreur liée à la non synchronisation des systèmes embarqués : Comme déjà expliqué dans le paragraphe 3.3.7, les différentes latences impliquées dans les systèmes informatiques font que les informations seront reçues avec un délai et notre connaissance distribuée des véhicules reflète l'état des véhicules dans un passé proche. Ces informations ont ainsi besoin d'être recalées dans le temps en estimant leur vrai moment de génération. Notre méthode consiste à effectuer ce recalage lors du processus de prédiction. Nous ajoutons toutes les latences estimées au temps de prédiction. Ainsi, par cette méthode nous utilisons la prédiction aussi pour combler le retard inévitable dans notre système et nous obtenons une estimation plus vraisemblable des données échangées en fonction du temps et de l'espace.

Filtrage de Kalman

Afin d'améliorer la qualité de la prédiction, nous avons décidé d'utiliser un filtre de Kalman discret pour améliorer la qualité du positionnement, réduire les erreurs GPS et effectuer la prédiction des positions futures. La figure 4.8 illustre la manière avec laquelle ce filtre a été utilisé. En effet, comme tout filtrage récursif, ce filtre comprend deux étapes : une étape de prédiction de la trajectoire selon un modèle prédéfini d'évolution et une étape de correction du celui ci une fois les mesures (observations) sont disponibles [15].

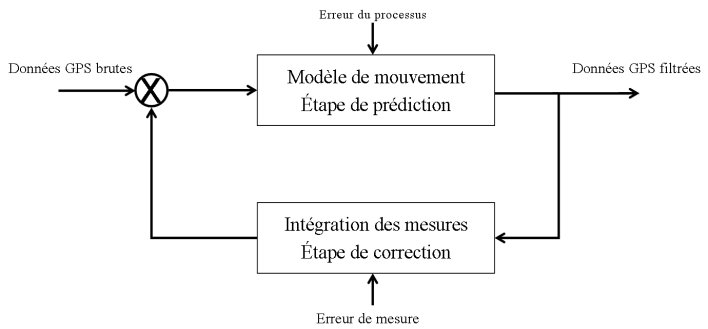

FIG. 4.8 – Le filtrage des positions est effectué à la base d'un filtre de Kalman

A noter que pour pouvoir utiliser ce filtrage, nous avons fait la supposition que l'erreur sur le positionnement par récepteur GPS a la forme d'un bruit blanc gaussien. Par exemple dans le cas de la prédiction d'une trajectoire rectiligne, le filtre sera linéaire et pourra être décrit de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_y \\ a_x \\ a_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_y \\ a_x \\ a_y \end{pmatrix} \tag{4.2}$$

où le $\{x, y\}$ est le vecteur position.
$\{V_x, V_y\}$ est le vecteur position.
$\{a_x, a_y\}$ est le vecteur accélération.
ΔT est la période de temps entre deux prédictions.

Ce modèle de mouvement est intégré dans la phase de prédiction d'un filtre de Kalman discret de la forme :
Etape de prédiction :

$$\hat{X}_{k/k-1} = A_{k-1}\hat{X}_{k-1/k-1} + B_{k-1}u_{k-1}; \tag{4.3}$$

$$P_{X_{k/k-1}} = A_{k-1}P_{X_{k-1/k-1}}A^t_{k-1} + R_{v_{k-1}} \tag{4.4}$$

où

$$\hat{X} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_y \\ a_x \\ a_y \end{pmatrix} \tag{4.5}$$

est le vecteur d'état.

La matrice de prédiction A donc :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{4.6}$$

Cette prédiction est effectuée en l'absence d'un signal de commande u.

La matrice de variance du système P est mise à jour à chaque étape de prédiction. Cette matrice jouera un rôle de détermination des dimensions des ellipses d'incertitude.

R_v est la matrice de covariance du processus.

Etape de correction :
Une fois les mesures de positions et vitesses disponibles, nous effectuons une correction de notre modèle. Soit Z le vecteur d'observation.

$$Z_k = \begin{pmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_k \end{pmatrix} \tag{4.7}$$

Cette observation sera liée au vecteur d'état par l'équation :

$$Z_k = C_k X_k \tag{4.8}$$

où

$$C_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{4.9}$$

est la matrice de mesure.

Le gain K du filtre de Kalman est donc calculé selon l'équation suivante :

$$K_k = P_{X_{k/k-1}} C_k^t \left[C_k P_{X_{k/k-1}} C_k^t + R_n \right]^{-1} \tag{4.10}$$

Où R_n est la matrice de covariance du bruit de mesure.

Et en utilisant ce gain, nous effectuons une correction de notre prédiction selon l'équation suivante :

$$\hat{X}_{k/k} = \hat{X}_{k/k-1} + K_k(Z_k - C_k \hat{X}_{k/k-1}) \tag{4.11}$$

Et nous mettons à jour la matrice de de variance P :

$$P_{k/k} = (I - K_k C_k) \times P_{k/k-1} \tag{4.12}$$

Le vecteur accélération $\{a_x, a_y\}$ sera donc estimé par ce filtre.

Nous utilisons ce filtrage aussi pour déterminer les dimensions et l'orientation de nos ellipses d'incertitudes. Ainsi, la première sous-matrice carré de dimension 2 de la matrice P aura des vecteurs propres qui désignent les deux axes principaux de l'ellipse. Les valeurs propres correspondantes donnent les dimensions de ces axes.

Exemples de filtrage :

En vue d'illustrer l'utilité de ce filtrage, nous l'avons appliqué à des données issues de deux GPS ; le résultat des positions filtrées est présenté sur la figure 4.9 par des points rouges en comparaison avec les points bleus qui représentent les données GPS brutes. Nous constatons sur la figure 4.9 la réduction des bruits de mesure puisque les positions filtrées présentent une trajectoire plus lisse qui suit instantanément les données brutes.

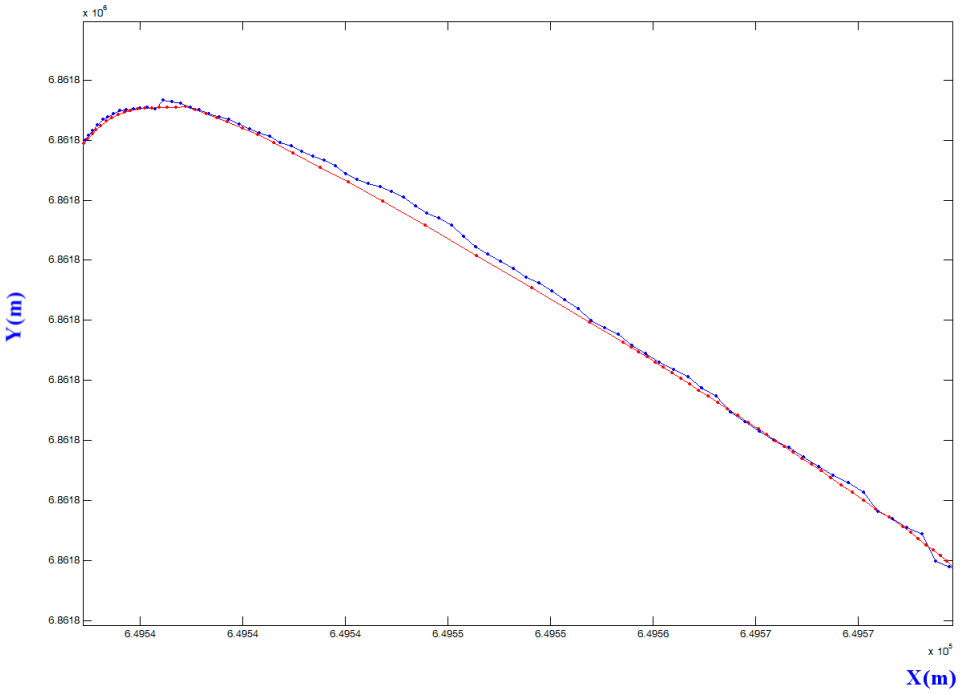

FIG. 4.9 – En bleu, les positions GPS brutes et en rouge, les positions lissées pas le filtre Kalman proposé

4.2.6 Indices de risque et de dangerosité

Le risque de collision dans les systèmes ADAS actuels sont souvent communiqués aux conducteurs à travers un indicateur simple. Cet indicateur doit à la fois être représentatif de la dangerosité de la situation sans nécessiter un effort intellectuel pour l'interpréter. Dans [14], Gettman et al propose un ensemble d'indicateur de risque de collision. Dans la suite, nous allons reporter quelques indicateurs de risque qui nous paraissent adéquats pour nos scénarios de test choisis :

- Temps à collision TTC[3] : le plus populaire des indicateurs. C'est le temps qui sépare les deux véhicules d'un éventuel choc s'ils préservaient le même profil de conduite. Cet indicateur doit être comparé au temps de réaction du conducteur et au temps de réaction des actionneurs du véhicule. Le choc devient inévitable si le TCC devient inférieur à la somme de ces temps de réaction. Dans ce cas, il n'est plus question d'éviter le choc mais plutôt de limiter les dégâts de l'éventuelle collision.
- Rapport des distances d'arrêt : c'est le rapport entre la distance nécessaire pour stopper le véhicule et la distance estimée à la collision. Ce rapport est intéressant pour savoir si le choc est toujours évitable par simple freinage. Ce rapport est par définition différent pour chaque véhicule puisqu'il dépend des caractéristiques propres à chaque véhicule. En effet, la distance d'arrêt doit prendre compte de la capacité de freinage du véhicule et de l'adhérence des pneus à la chaussée.
- Minimum TCC : le temps de collision minimal constaté durant l'estimation du risque. Ce temps marque la configuration la plus dangereuse. A ce moment, il est intéressant aussi de rapporter la distance et la différence de vitesse entre les deux véhicule.
- Post Encroachment Time (PET) : c'est le temps estimé entre le passage du véhicule 1 par une position donnée et le passage du véhicule 2 dans la même position. Cet indicateur peut être utile pour les configurations où la zone de conflit est connue et limitée.
- Le rapport des décélérations d'arrêt : C'est le rapport entre la décélération nécessaire pour arrêter le véhicule juste avant le point de collision et la décélération maximale du véhicule. Un rapport supérieur à 1 signifie que le freinage seul est incapable d'éviter le choc. D'autres manœuvres comme le braquage du volant seront ainsi nécessaires.

Dans la suite, nous allons essayer de concevoir un indice de risque approprié pour chaque scénario étudié.

4.3 Scénarios étudiés

Comme présenté dans le paragraphe 4.1.3, les accidents sur intersections peuvent être classés en trois catégories principales comme montré sur la figure 4.10 :

- Choc latéral entre deux véhicules venant à partir de deux branchements d'un carrefour
- Choc latéral d'un véhicule tournant à gauche avec un véhicule venant de face
- Choc arrière ou latéral d'un véhicule tournant à droite avec un véhicule arrivant de gauche

[3]Time To Collision

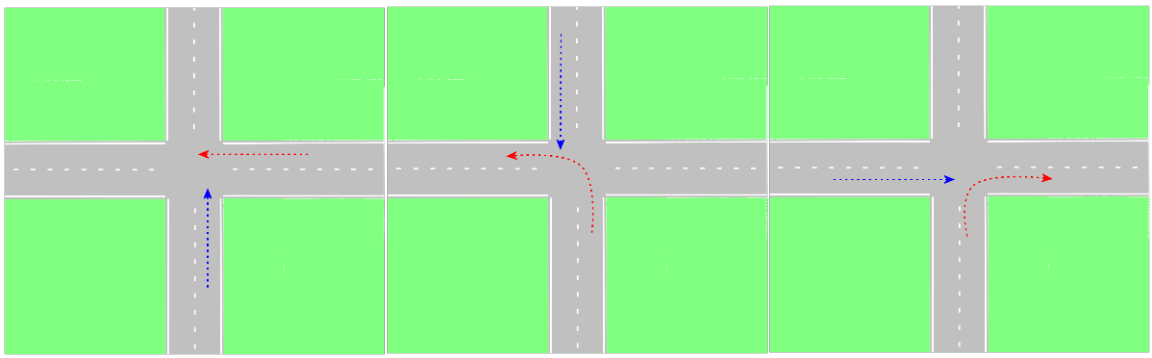

FIG. 4.10 – a- croisement directe, b- tourner à gauche, c- tourner à droite

Dans la suite du chapitre, nous allons examiner de près les deux premières situations. Nous allons d'abord appliquer notre algorithme de prévention de risque à l'approche des intersections sur des données réelles. Dans un deuxième temps, nous allons proposer un indicateur de risque adéquat qui reflète au mieux le risque présent.

4.3.1 Trajectoires rectilignes

Dans ce scénario, le danger se présente dans ce cas si les deux conducteurs ne sont pas conscients de l'existence d'un carrefour ou de la présence de l'autre véhicule arrivant sur le carrefour. Dans ce cas, ces deux véhicules vont poursuivre leur conduite avec le même profil de vitesse et d'accélération en trajectoires rectilignes. Le choc se produira alors si les trajectoires respectives se coupent au même moment, c'est à dire si les véhicules passent en même temps sur la zone de conflit du carrefour.

4.3.1.1 Spécificité de la prédiction

Si aucune information de risque n'est remontée au conducteur ou les conducteurs réagissent lentement à l'information envoyée, les horizons de déplacement des deux véhicules sont calculés en supposant que les deux conducteurs continueraient leurs trajectoires rectilignes avec les mêmes vitesses et les mêmes accélérations selon l'équation suivante :

$$X = X_0 + \Delta T V + \frac{\Delta T^2}{2} A \tag{4.13}$$

où $X = \{x, y\}$ est le vecteur position GPS du véhicule.
$X_0 = \{x_0, y_0\}$ est le vecteur de la position initiale du véhicule.
$V = \{V_x, V_y\}$ est le vecteur vitesse du véhicule obtenu à partir du récepteur GPS.

$A = \{a_x, a_y\}$ est le vecteur accélération du véhicule obtenu à partir du filtre de Kalman. et ΔT est la période entre le temps actuel et le temps où le véhicule était à la position X_0

Nous avons choisi d'effectuer le calcul des trajectoires avec un horizon temporel de 5 sec. Ce temps permet de laisser au conducteur un temps de manœuvre confortable pour éviter le choc. Pratiquement, nous commençons donc par échantillonner l'horizon de 5 sec avec une résolution de 0.5 sec. Nous calculons pour chaque instant les positions instantanées selon les méthodes déjà décrites. Ensuite, nous associons à chaque position l'ellipse d'incertitude du véhicule correspondant.

4.3.1.2 Détection de collision sur l'horizon temporel

Pour qu'une collision ait lieu effectivement entre deux véhicules, il faut que deux conditions soient réalisées :

- Les trajectoires rentrent en intersection au même endroit.
- L'intersection a lieu dans le même intervalle temporel.

Du point de vue des configurations de risque, ils existent deux intervalles de temps qui correspondent aux limites de la zone de conflit. Un de ces deux scénarios est illustré sur la figure 4.11. En effet, le temps t_1 correspond au premier moment où le véhicule 1 peut heurter le devant du véhicule 2. Le temps t_2 correspond respectivement au dernier moment possible de choc avec l'arrière du véhicule2. Le même raisonnement appliqué à l'autre véhicule aboutit donc à deux intervalles de temps $\left\{t_1^{veh_1}, t_2^{veh_1}\right\}$ et $\left\{t_1^{veh_2}, t_2^{veh_2}\right\}$. Pour que le choc soit possible, il faut que ces deux intervalles se chevauchent. Dans le cas contraire, nous jugeons que la situation est sans risque de collision entre les deux véhicules.

4.3.1.3 Indice de risque

D'une manière pratique, nous commençons par calculer, de proche en proche (toutes les 0.5 sec) et pour chacune des positions prédites, les distances entre les cercles des ellipses d'incertitudes de deux véhicules à cet instant.
Une fois le choc détecté (analytiquement la distance entre deux cercles est inférieure à la somme de leurs rayons), il existe à cet instant précis deux indicateurs qui nous intéressent :

- L'instant où le choc est détecté est le Time To Collision TTC : la connaissance de ce temps est primordiale pour évaluer le risque. En effet, Cette valeur temporelle correspond aux instants qui restent au conducteur pour pouvoir manœuvrer afin d'éviter le choc ou bien dans les pires des cas de diminuer son impact.
- Le nombre de cercles qui sont impliqués dans ce choc : ce nombre nous donne une idée de la dangerosité du choc. En effet, un choc qui implique un nombre plus important de cercles doit être un choc plus dangereux.

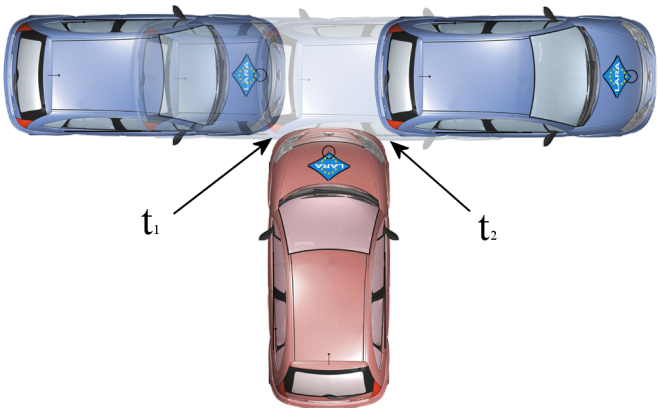

FIG. 4.11 – La collision est seulement possible entre le temps t_1 et t_2

Pour pouvoir constituer un indice de risque plus élaboré, nous n'arrêtons pas le calcul à l'instant du premier choc. Nous poursuivons le même calcul sur le reste du temps de prédiction.
A partir de cette série de calcul, nous pouvons extraire l'indicateur suivant :

- La durée durant laquelle la collision persiste entre les deux véhicules : cette indicateur délivre une information intéressante : plus la durée de choc est élevée plus la collision est probable et dangereuse.

Il existe deux approches d'indicateurs de risque, qui découlent de deux visions différentes du risque :

- Une approche conservatrice : les partisans de cette approche préfèrent avoir le maximum de sécurité. Selon cette approche, un indicateur de risque est conçu pour délivrer un indice très simple qui reflète la pire situation qui peut se présenter. Si cet indicateur maintient le conducteur alerté par le maximum du risque, cette alerte maximale peut nuire à la crédibilité du système pour une grande catégorie de conducteur. Dans notre cas, ceci revient à fournir un indicateur simple de type TTC informe le conducteur du temps qui lui reste jusqu'au début de l'impact sans prendre en compte la crédibilité et la pertinence de cette information.
- une approche plus sophistiquée : Selon cette approche, une étude plus profonde de la situation est effectuée. L'indicateur finale cherche à fiabiliser son alerte en cherchant, à la fois, à relativiser l'indice de risque selon la crédibilité de la détection et la dangerosité de l'impact. Dans notre cas, un tel indicateur cherche par exemple à nuancer le TTC par les informations relatives à la collision prévue comme le temps total de la collision et la configuration du choc.

Pour fournir une meilleure estimation du risque, nous allons examiner les trois paramètres déjà cités : le TTC, la durée de choc et le nombre de cercles impliqués.

Ces trois paramètres sont intimement liés à l'incertitude du positionnement. Étudiés ensemble, ils permettent d'avoir une idée sur le moment du choc, sa gravité et sa pertinence.

Sur la figure 4.12, nous illustrons notre fonction classique du risque de collision calculée à partir du TTC. Il existe deux parties constantes de cette courbe :

1. Si le TTC est inférieur à 2 sec : dans ce cas, nous jugeons que le choc est inévitable et le risque est maximale quel que soit la durée du choc.
2. Si le TCC est supérieur à 5 sec : le conducteur dispose donc d'au moins 5 sec pour anticiper le risque. Ce temps est jugé suffisant, c'est pour cela que nous marquons que le risque est minimum.

Entre les deux zones certaines, il existe une zone où le TTC est compris entre 2 et 5 sec. Dans cette zone, nous avons choisi de représenter linéairement le risque en fonction du TTC.

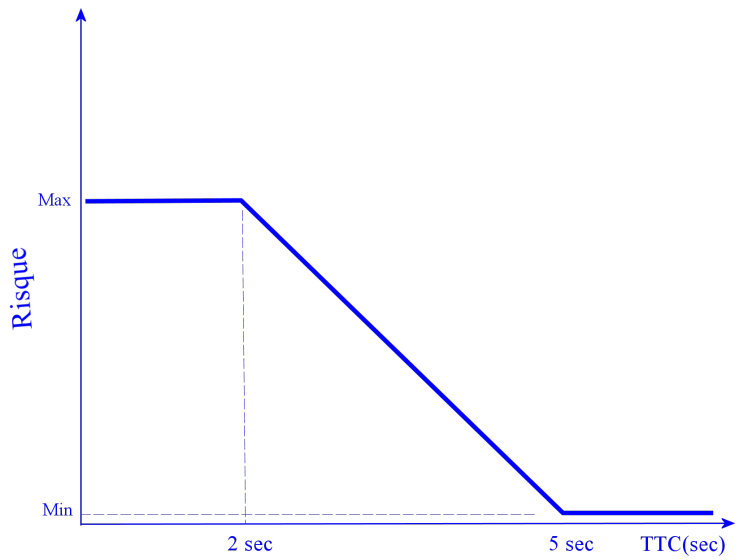

FIG. 4.12 – La fonction du risque

4.3.1.4 Expérimentations

Nous avons effectués plusieurs expériences sur plusieurs sites urbains et ruraux. Il n'y avait pas de différence majeure entre les différents sites sauf pour les questions de portée qui dépend essentiellement de la visibilité sur le carrefour étudié.
Nous reportons ici une expérience effectuée sur le site Vélizy en région Parisienne. Dans ce scénario, nous expérimentons l'arrivée de *lara1* et *lara2* sur une intersection. La détection de l'approche de ce carrefour se fait à partir de l'angle entre les deux vecteurs vitesse représentés sur la figure 4.13 et qui est aux alentours de 50°. Cette détection va déclencher les algorithmes de prédiction sur chaque véhicule qui commence à calculer son propre horizon de déplacement ainsi que celui de l'autre véhicule.

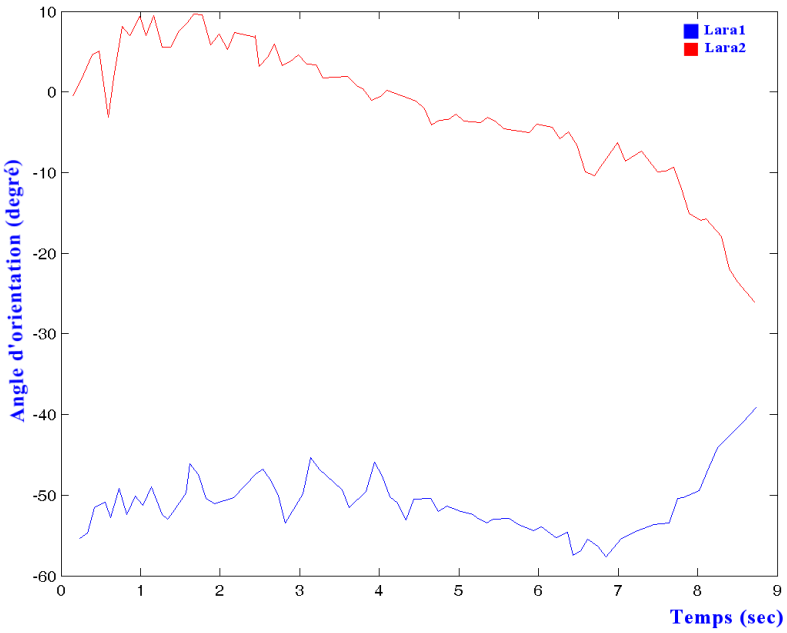

FIG. 4.13 – En bleu, l'angle d'orientation du *lara1* et en rouge l'angle d'orientation du *Lara2*

Sur les figures 4.14 et 4.15, nous montrons les trajectoires des véhicules *Lara* ainsi que leur profil d'informations disponible via la communication (à noter l'angle du volant, l'état des freins et la vitesse). En se basant sur ces informations, chaque véhicule commence à calculer sa trajectoire et la trajectoire de l'autre véhicule sur un horizon temporel à venir.

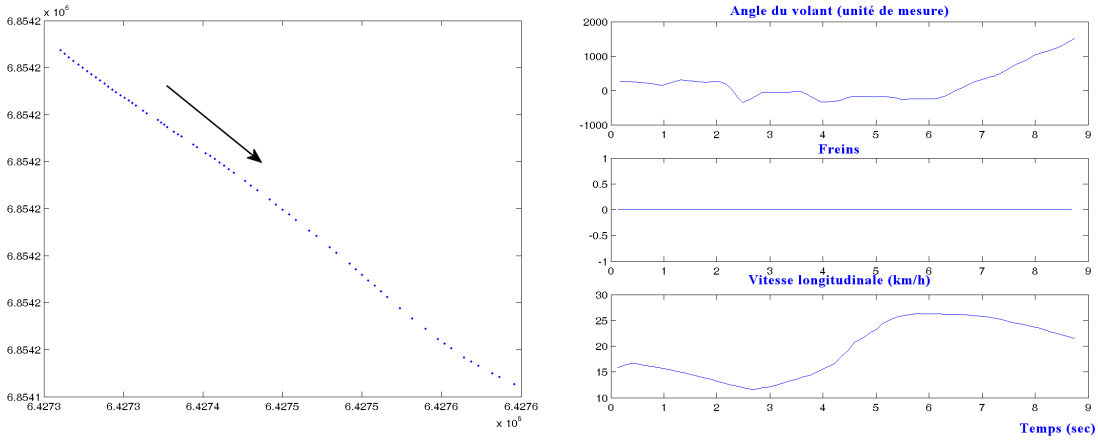

FIG. 4.14 – A gauche, la trajetoire de *Lara1* et à droite l'angle du volant, l'état des freins et la vitesse respectifs de *Lara1*

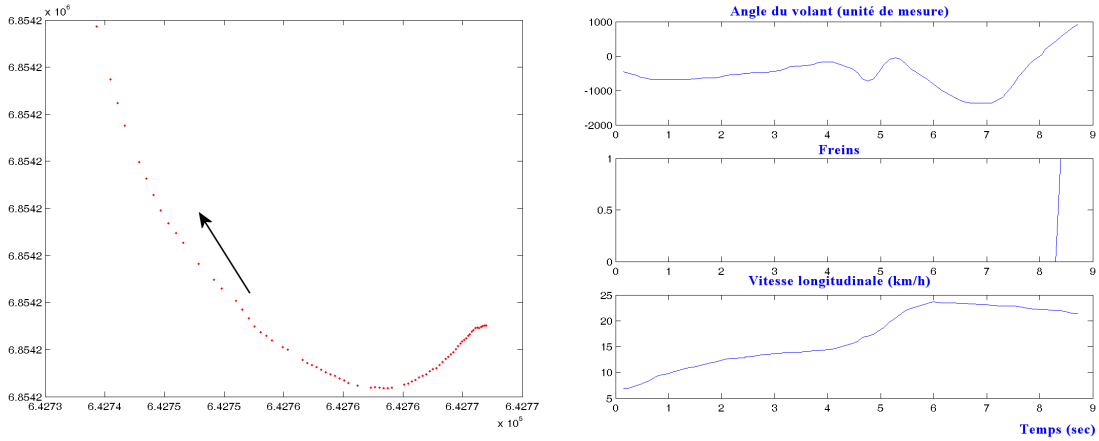

FIG. 4.15 – A gauche, la trajetoire de *Lara2* et à droite l'angle du volant, l'état des freins et la vitesse de *Lara2* respectifs

Sur la figure 4.16, nous prenons un exemple des trajectoires de *lara1* et *lara2* telles que calculées sur *lara1*. Cette prédiction est schématisée par les ellipses d'incertitude respectives. Une analyse des distances entre les cercles englobant à chaque instant permet de détecter si la collision aura lieu, où et quand.

Sur la figure 4.16, nous montrons à gauche les positions des véhicules à un instant t_1, Les points en bleu (respectivement en rouge) représentent l'historique des positions de

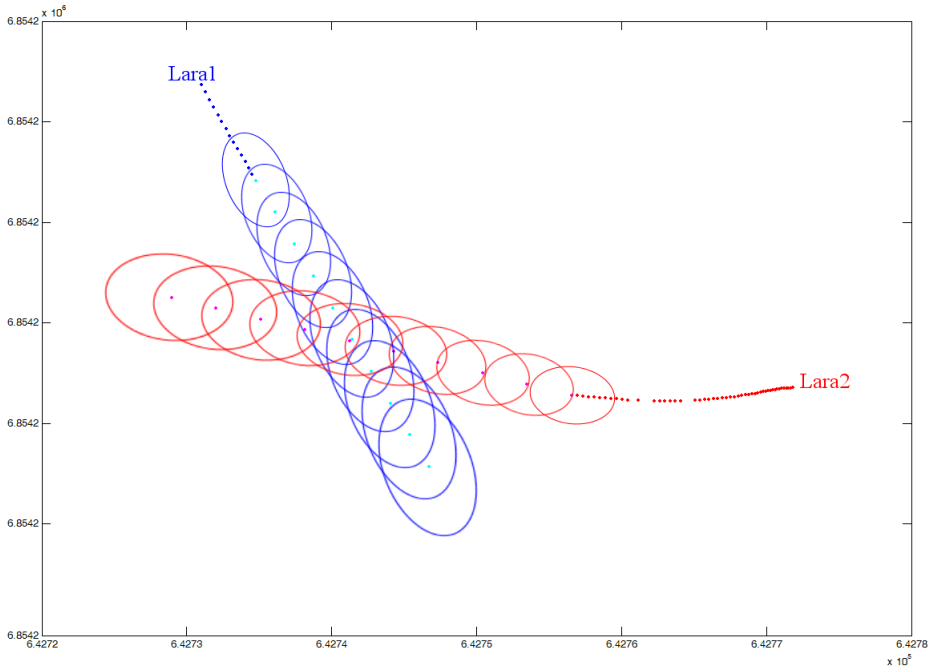

FIG. 4.16 – Les trajectoires prédites des deux véhicules vues par *Lara1*

Lara1 (respectivement *Lara2*). Tandis que les ellipses en bleu (respectivement en rouge) représentent les ellipses d'incertitudes des positions prédites de *Lara1* (respectivement *Lara2*) dans un horizon temporel de 5 sec.

Pour analyser le risque dans ce scénario, nous commençons par visualiser les trajectoires complètes des deux véhicules pendant toute la durée de l'intersection sur la figure 4.17. Cette figure montre aussi la distance entre les deux véhicules estimée pendant les 9 secondes de ce parcours. Nous remarquons donc que les deux véhicules se rapprochent l'un de l'autre jusqu'à une distance de 9 mètres à la sixième seconde.

La figure 4.18 représente une analyse détaillée de l'évolution des trois paramètres de risque sur l'intersection. En effet, la figure en haut montre l'évolution temporelle du TTC prédit entre les deux véhicules. La figure du milieu représente la durée de choc prévue entre les deux véhicules. Et sur la figure en bas, nous montrons l'évolution dans le temps du pourcentage maximal de cercles *Lara1* impliqués dans la collision au moment du choc.

Cet exemple illustre un cas typique. En effet, les véhicules commencent à détecter un choc potentiel juste après la deuxième seconde. Ce choc est prévu dans un temps assez

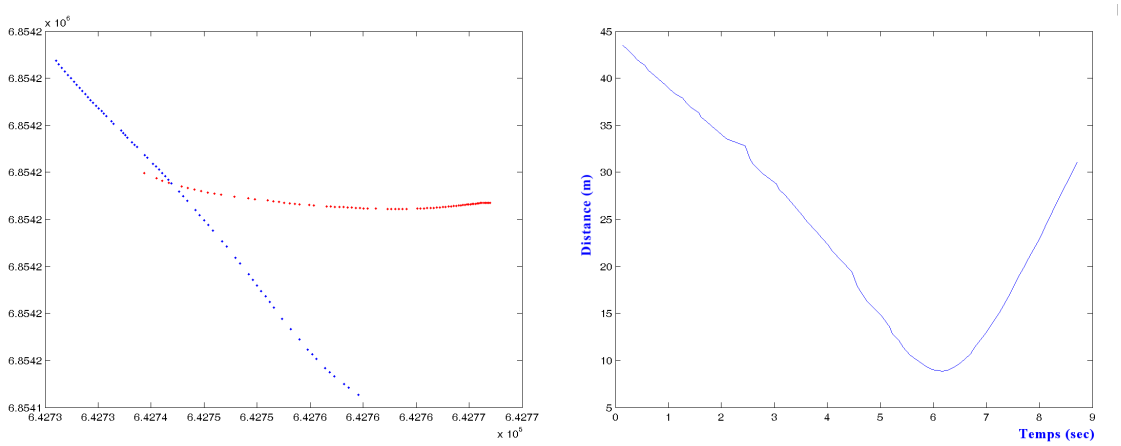

FIG. 4.17 – A gauche, les trajectoires des deux véhicules et à droite la distance correspondante

lointain de 4.5 sec. La durée de choc et le nombre de cercles correspondants sont aussi petits. Nous sommes donc dans un cas de choc peu dangereux et peu persistant. Tout en avançant dans le temps, les véhicules continuent à détecter ce choc qui devient de plus en plus proche en terme de TTC. La durée de choc et le nombre de cercles continuent de leur côté de créditer la dangerosité de ce choc en affichant des valeurs de plus en plus grandes. Le maximum de risque est affiché donc à la seconde 4.5 c'est à dire au moment où le seuil de 2 sec de temps TTC est affranchie. A ce moment, le maximum de risque est communiqué au conducteur quels que soient la durée et le nombre de cercles. Notons également qu'à ce moment, la durée du choc et le nombre de cercles commencent à décroître. Ceci peut s'expliquer par le fait que le choc, même s'il est inévitable, va se produire dans une configuration non excessivement dangereuse parce que la durée et le pourcentage de la dimension du véhicule impliqué dans le choc sont petits. Après ce moment, le TTC commence à augmenter de nouveau puisque l'un des véhicules réduit considérablement sa vitesse en freinant. Nous rejoignons ainsi rapidement une configuration sûre après le passage de l'un des véhicules.

Notons que lors de ce test, les conducteurs ne se sont pas allés jusqu'à provoquer un vrai choc ! Le passage d'un véhicule devant l'autre était bien planifié avant le test. Mais nous avons laissé le choix au conducteur de choisir son profil de vitesse et d'accélération.

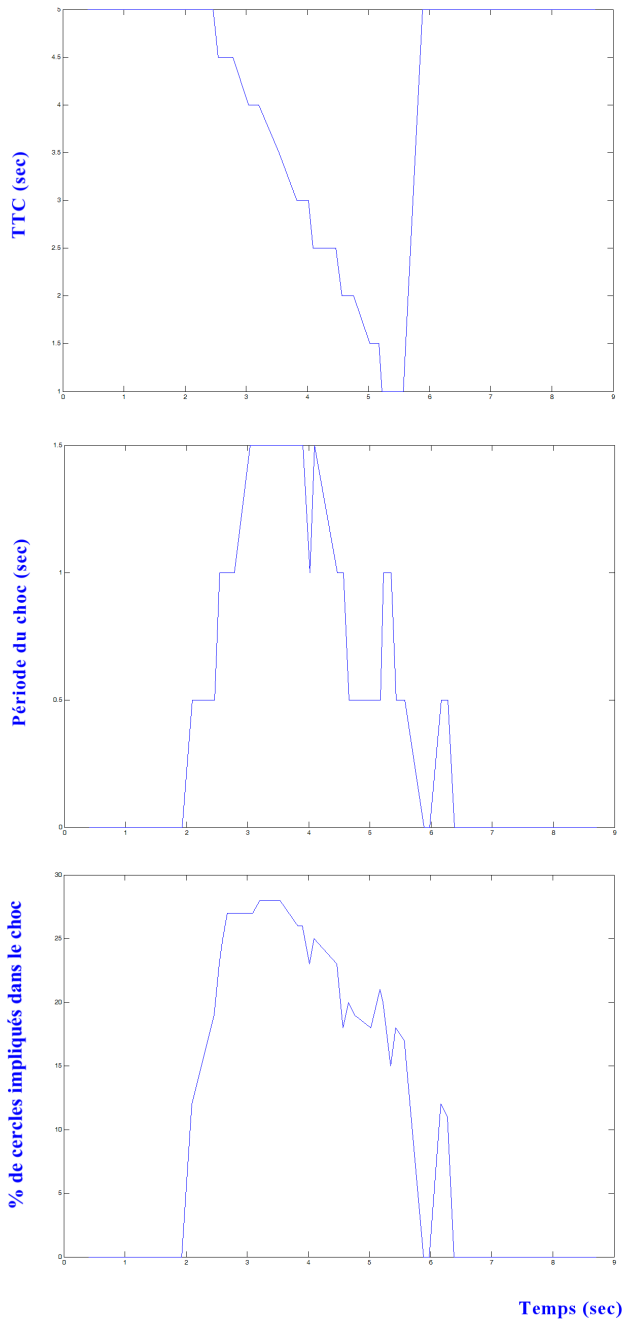

FIG. 4.18 – De haut en bas : le TTC, La durée prévue du choc et le pourcentage de cercles impliquées en fonction du temps de l'expérience comme estimés par *Lara1*

4.3.2 Trajectoires croisées : tourner à gauche

Dans un scénario simple, le véhicule arrivant sur intersection s'arrête au milieu du carrefour (Nous appelons ce moment "point d'arrêt") pour repérer les véhicules sur la voie de face et déterminer ainsi le temps nécessaire pour tourner à gauche et rejoindre la voie transversale de gauche.
Sur la voie de face, les véhicules doivent a priori poursuivre leur trajectoire d'une manière rectiligne (sauf si un changement d'attitude nous permet de prévoir un changement de trajectoire). En s'approchant de l'intersection, le conducteur examine la zone de conflit pour voir s'il existe des véhicules qui essayent de rejoindre les voies transversales.

Contrairement au cas précédent où la configuration présente une symétrie totale entre le comportement des deux véhicules, il est nécessaire dans ce cas d'examiner indépendamment le comportement et la manière de fonctionner de chaque véhicule.

Du point de vue du véhicule tournant, le conducteur estime le temps d'arrivée du véhicule de face et le compare au temps d'établissement de sa manœuvre de tourner et prendre la voie gauche. En fonction de cette comparaison, il doit avoir un avis binaire : passer avant ou après l'arrivée du véhicule de face.
Le système humain de détection de risque peut avoir de types d'erreurs :

- Une erreur dans l'estimation de la position et la vitesse du véhicule qui arrive de la voie de face : ce genre d'erreur trouve son remède avec l'utilisation de la communication qui améliore considérablement l'estimation de ces paramètres.
- Une erreur de l'estimation du temps de nécessaire pour passer du "point de stop" à la voie de destination en passant à travers la zone de conflit. Une bonne estimation de ce temps est intimement liée à l'exactitude et le réalisme d'un modèle de déplacement qui prend en compte les vraies capacités du véhicule.

Pendant ce temps, le véhicule qui vient en trajectoire rectiligne et qui dispose de la priorité de passage doit, a priori, continuer sa trajectoire rectiligne même s'il est conscient de l'intention de l'autre véhicule de traverser le carrefour. Ceci est vrai tant que l'autre véhicule n'a pas encore commencé sa manœuvre.

La vigilance du conducteur de ce véhicule commence à s'accroître dans le cas où le véhicule sur carrefour décide de ne pas attendre le passage du véhicule de face et commencer sa manœuvre avant son passage. L'utilisation de la communication permet d'assurer la prise en considération de ce début de manœuvre le plus tôt possible. La situation est dangereuse si le véhicule sur carrefour commence sa manœuvre tardivement. Ainsi, le calcul du risque de collision démarre dans le véhicule de face seulement lorsque le véhicule sur carrefour commence sa manœuvre.

4.3.2.1 Spécificité de la prédiction

Tout revient donc à modéliser le temps de passage du véhicule tournant entre le point d'arrêt et sa voie de gauche. Afin de simplifier cette manœuvre effectuée normalement en courbure, nous proposons un modèle géométrique rectiligne entre le point d'arrêt où la vitesse du véhicule est nulle et le début de la voie de gauche. Nous modélisons cette trajectoire par un mouvement rectiligne avec une accélération maximale de démarrage du véhicule ($V_0 = 0$). La trajectoire du véhicule peut être donc régie par l'équation :

$$X = \frac{1}{2}at^2 \tag{4.14}$$

Avec a l'accélération de confort maximale de démarrage. A partir de l'équation 4.14 et pour une largeur de voie de 3.5 m, nous pouvons estimer le temps de passage sur la voie de gauche de $\sqrt[2]{\frac{2X}{a}}$.
Même si l'accélération est bien différente d'un véhicule à l'autre, nous allons prendre une accélération de démarrage de $0.18g$ pour nos C3 Lara (d'après les tests réalisés par Automoto). Cette accélération correspond au temps de passage TP de 3.9 sec pour traverser la zone de conflit de largeur de 3.5 m par exemple.

4.3.2.2 Indice de risque

Comme décrit auparavant, notre l'algorithme commence par estimer, sur le véhicule tournant à gauche, le temps d'arrivée TA du véhicule en face sur le carrefour. Il le compare ensuite au TP : si TA $>$ TP il décide de passer avant son arrivée, si TA $<$ TP il attend son passage pour tourner.
Dans le cas où le véhicule a déjà commencé à tourner, le système fonctionne sur les deux véhicules, nous utilisons donc le même indice que dans le cas des véhicules à trajectoires perpendiculaires présenté dans la paragraphe 4.3.1.3 en utilisant le modèle de mouvement spécial à cette configuration.

4.3.2.3 Expérimentations

Nous allons présenter, dans la suite, un de nos tests effectués avec les 2 prototypes *Lara1* et *Lara2* sur le site Vélizy.
Le but de ce test est de schématiser le scénario 2 du point de vue du véhicule qui tourne à gauche. Nous allons donc lui fournir un temps limite à partir duquel il n'est plus sûr de passer l'intersection. Sur la figure 4.19, nous reportons les positions de deux véhicules (*Lara1* en bleu et voulant prendre la voie transversale et *Lara2* en rouge avec une trajectoire rectiligne). Le carré rouge indique la zone de conflit sur le carrefour.

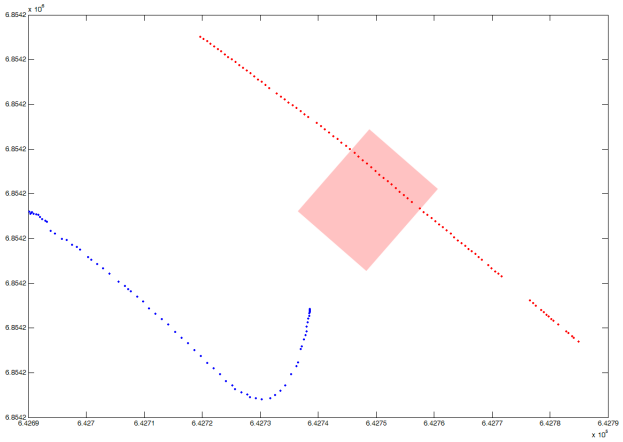

FIG. 4.19 – Scénario 2 : *Lara1* veut tourner à gauche tandis que *Lara2* veut passer l'intersection

Sur les figures 4.20 et 4.21, nous illustrons les paramètres des capteurs de *Lara1* et *Lara2* respectivement. Nous remarquons sur la figure 4.20 que *Lara1* active son clignotant gauche, réduit sa vitesse jusqu'à la valeur nulle et tourne son volant en attente du temps convenable pour passer la zone de conflit.
Tandis que sur la figure 4.21 qui reporte les paramètres de *Lara2* comme reçus par *Lara1*, nous remarquons que ce véhicule continuent sa trajectoire en ligne droite avec une vitesse longitudinale de 25 km/h.
Dans ce scénario, *Lara1* ne va pas essayer de passer brutalement, il attend une configuration convenable au passage. De ce fait, l'algorithme de calcul de risque sera activé seulement sur *Lara1* et pas sur *Lara2* qui continue son chemin.

Comme présenté dans le paragraphe 4.3.2.2, nous calculons sur *Lara1* l'horizon de déplacement de *Lara2*. Ce calcul sert donc à calcule le temps d'arrivée de *Lara2* sur la zone de conflit.
La figure 4.22 donne les valeurs estimées de ce temps. Nous constatons ainsi que le temps d'arrivée TA devient inférieur à la limite de 3.9 sec au temps T_L. Par conséquent, il sera dangereux de passer la zone de conflit après T_L. A partir de cet instant T_L, le conducteur sera alerté afin d'attendre le passage de *Lara2* pour pouvoir continuer sa manœuvre d'une façon sûre.

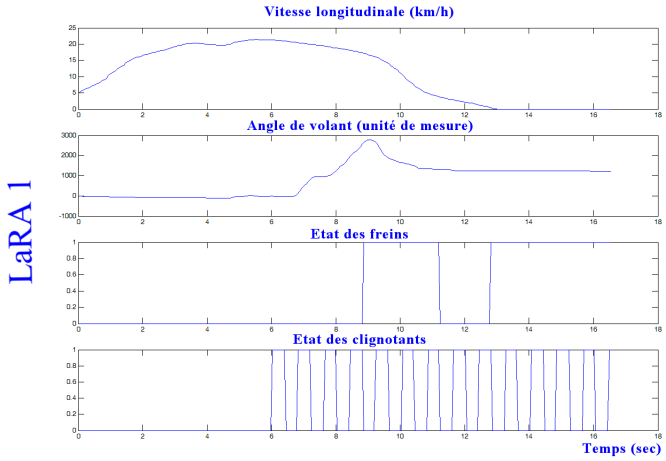

FIG. 4.20 – De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara1* pendant le test

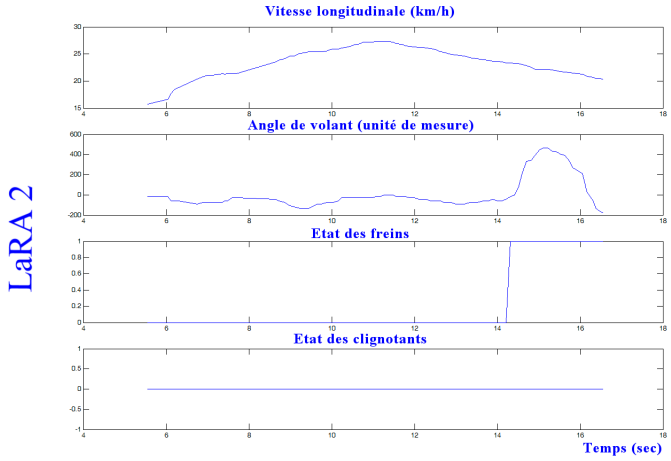

FIG. 4.21 – De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara2* comme reçu par *Lara1* pendant le test

4.4 Conclusions et recommandations

Dans ce chapitre, nous avons essayé de fournir une étude détaillée de la conception d'un système de prévention de risque de collision avec les autres véhicules à l'approche d'une intersection. Notre système coopératif utilise uniquement les informations échangées

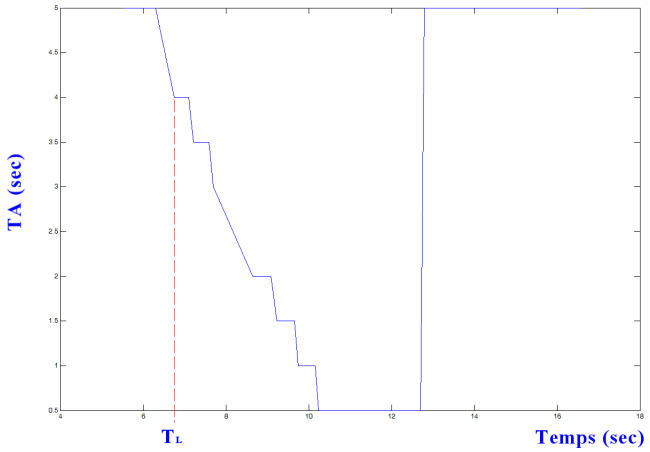

FIG. 4.22 – Le temps d'arrivée TA de *Lara2* à la zone de conflit

entre les véhicules par la voie de la communication pour fournir à chaque véhicule une prédiction des trajectoires des différents véhicules avoisinants et pour estimer le risque de collision avec ceux-ci.

Dans le but d'intégrer les erreurs de positionnement dans le processus d'estimation de risque, nous avons proposé de remplacer la notion de position exacte du véhicule par la notion de l'ellipse d'incertitude de positions.
Pour rendre le calcul plus aisé, nous modélisons cette ellipse par un modèle géométrique de cercles adjacents.

Pour effecteur la prédiction des trajectoires qui est au cœur de notre système de prévention de risque, nous avons proposé aussi un modèle de déplacement du véhicule. Ce modèle est ensuite utilisé dans un processus de filtrage par un filtre de Kalman. L'utilisation de ce filtre possède deux avantages : il permet à la fois de réduire les erreurs de positionnement et d'estimer les dimensions des ellipses d'incertitude des véhicules.

Au niveau expérimental, nous avons testé notre système sur notre flotte de véhicule. Ainsi, nous avons étudié deux des scénarios les plus risqué sur croisement : l'arrivée sur intersection par des voies adjacentes et la manœuvre de tourner à gauche pour prendre la voie latérale.

La particularité du premier scénario réside dans la prédiction des trajectoires rectilignes des véhicules. Nous proposons une analyse du risque basée sur trois paramètres : le TTC ou temps à collision, la durée du choc prévue et la dimension du véhicule impliqué dans le choc. Ces trois paramètres fournissent un indice de risque qui prend en compte le

temps, la persistance et la configuration du choc.

Tandis que dans le deuxième scénario, le système vise à aider le passage du véhicule sur l'intersection. Il estime le temps de passage du véhicule tournant et le compare au temps d'arrivée du véhicule en face. Le système recommande ainsi de passer avant l'arrivé du véhicule ou d'attendre son passage pour rejoindre la voie latérale.

Contrairement à la plupart des solutions proposées dans la littérature, cette étude expérimentale nous a permis de mettre en œuvre une gestion d'une intersection par une manière décentralisée sur chaque véhicule et sans le passage par une station de base.
Cette gestion décentralisée permet de réduire le coût de déploiement d'une telle application puisque nous n'avons plus besoin d'équiper toutes les intersections par des moyens de communication ; sauf peut être les intersections si profondes où la communication entre les véhicules est fonctionnellement insuffisante pour la gestion de risque. Dans ce cas, les intersections peuvent être équipées d'un point relais au milieu de l'intersection qui jouera le simple rôle de miroir qui "réfléchit" les informations provenant d'une des branches du carrefour dans les autres branches.

Afin d'améliorer ce système, nous citons quelques pistes :

- Pour une prédiction plus fiable, nous proposons de modéliser le comportement du véhicule par un modèle dynamique qui prend en compte les paramètres dynamiques du véhicule de test.
- La précision du système de positionnement pèse sur l'ensemble des processus d'estimation de risque. L'amélioration de système de positionnement ne peut qu'améliorer les performances du système.
- Le remplacement de la notion des ellipses d'incertitude par le modèle plus complet des gaussiennes de probabilité de positions. La détection de collision se fait donc à partir du produit des gaussiennes des deux véhicules. L'utilisation de ces gaussiennes permet de combiner les trois paramètres étudiés dans le calcul de risque ; à savoir le TTC, la durée et la dangerosité du choc. Une généralisation de l'utilisation de ce modèle permet de faciliter l'extension de ce modèle vers un nombre plus important de véhicule.
- Dans le cas de l'utilisation des ellipses d'incertitude, une amélioration du modèle géométrique par cercles consiste à moduler le nombre et les dimensions des cercles par les dimensions de l'ellipse en temps réel.
- La proposition d'un indice unique de risque plus complet, qui combine tous les paramètres de risque étudiés.

Bibliographie

[1] J. Higle and M. Hecht, "A comparison of techniques for the identification of hazardous locations," Transportation Research Record, Vol. 1238, 1989

[2] Alexandre Revue, "Contribution des systèmes d'information Géographiques a la sécurité routière : approches multicapteurs pour l'évaluation de configurations a risque", rapport de thèse, Ecole des Mines de Paris, Décembre. 2003

[3] Gunnar Lind, Mohsen Towliat, Helena Svensson, "Effects of variable speed limits at intersections", Intelligent Transportation System, London 2006

[4] Jürgen Rataj, Mark Vollrath, "What is difficult at intersections ? Virtual and real driving", Intelligent Transportation System ITS 2006, London

[5] T. Fukuda, "Transporation Engineering (Kotsu Ko-gaku)". Asakura Shoten, 1994. (in Japanese)

[6] Morioka, Y. Sota, T. Nakagawa, M., "An anti-car collision system using GPS and 5.8 GHz inter-vehicle communication at an off-sight intersection", Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE VTS-Fall VTC 2000. 52nd,Publication Date : 24-28 Sept. 2000,On page(s) : 2019 - 2024 vol.5

[7] Kay Ch. Fuerstenberg,"Intersection driver assistance system - The EC project Inter-Safe", Intelligent Trasportation System ITS 2006, London.

[8] Gerdien Klunder, Arshad Abdoelbasier and Ben Immers, "Development of a micro-simulation model to predict road traffic safety on intersections with surrogate safety measures". Intelligent Trasportation System ITS 2006, London

[9] Paul Mathias, "The Intelligent Cooperative Intersection as Part of Urban Traffic Control Systems", 12th World Congress on ITS, 6-10 November 2005, San Francisco

[10] Benmimoun, A. Chen, J. Neunzig, D. Suzuki, T. Kato, Y., "Communication-based intersection assistance", Intelligent Vehicles Symposium, 6-8 June 2005, On page(s) : 308- 312

[11] http ://www.calccit.org/itsdecision/serv_and_tech/Collision_avoidance/intersection.html

[12] James A.Misener, "Intersection Decision Support (IDS) :Infrastructure and Cooperative Approaches to Intersection Safety",PATH Program-Wide Research Meeting, October 25, 2002.

[13] "Intersection Collision Avoidance Using ITS Countermeasures", U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration, September 2000

[14] Douglas Gettman, Lili Pu, "Theoretical validation of Surrogate Safety Assessment Methodology for roundabouts and cross intersections", Intelligent Transportation System ITS 2006, London

[15] Jay A. Farrell and Matthew Barth, "The Global Positioning System and Inertial Navigation", 1998

Chapitre 5

Aide à la décision dans un changement de voie

5.1 Introduction

Le changement de voie est une manœuvre typiquement appréhendée. En effet, durant la phase préparatoire au changement de voie, le conducteur examine son environnement de conduite. Il cherche toute source d'informations sur l'état de l'infrastructure routière et sur les profils de conduite des véhicules voisins. La communication peut s'avérer un moyen approprié pour assurer ce canal de transmission de l'information. Dans ce chapitre, nous étudions dans un premier temps et en détail les problèmes de changement de voie. Nous présentons ainsi une étude accidentologique liée au changement de voie. Cette étude des causes et des modalités d'accidents pendant un changement de voie nous guidera par la suite dans la conception d'un système d'assistance lors de la préparation d'un changement de voie. Ce système a pour objectif la prévention et l'estimation d'un risque de collision avec les véhicules environnants. L'idée principale est de prédire dans un horizon temporel plus ou moins proche les trajectoires des véhicules et d'estimer toute possibilité de collision. L'estimation de trajectoire repose sur une modélisation du mouvement des véhicules et dans ce cas particulier le mouvement durant le changement de voie. Nous proposons ainsi un modèle mixte géométrique et dynamique de changement de voie. Ce système sera ensuite testé et validé dans des scénarios réels en utilisant notre flotte de véhicules.

5.2 Définition d'un changement de voie

Dans la suite de ce chapitre, nous adoptons la définition de Chovan et al [2] du changement de voie comme étant : une variation délibérée (volontaire) et substantielle (ferme) dans la position latérale d'un véhicule. Cette définition nous permet d'exclure toutes les manœuvres de type Zigzags dans la même voie et toutes les manœuvres brusques d'évitement d'obstacles, de sortie involontaire de voies et de perte de contrôle sur le véhicule. En plus, nous ne traitons pas les changements de voie qui perturbent fortement le trafic en obligeant les véhicules environnants de modifier leur profils de conduite [19]. Conformément au code de la route, nous considérons que la maœuvre à étudier est limitée à un changement d'une seule voie à la fois.

Le changement plus ou moins brusque de la position latérale du véhicule peut être étudié sous deux angles différents :

1. Etude de la stabilité du véhicule pendant la manœuvre, d'où découlent toutes les études de contrôle latérale pour la détermination des trajectoires optimales au sens de l'utilisation des capacités maximales du contrôle du véhicule.
2. Etude du risque de collision avec les autres agents de la route (infrastructure routière et agents mobiles). Sans perdre le contrôle sur le véhicule, une collision peut se produire à cause d'une mauvaise estimation du risque lié à la manœuvre.

Dans ce chapitre nous étudions le deuxième cas de figure qui consiste à estimer le risque de collision en se basant sur la connaissance partagée entre les véhicules. Le rôle de la communication intervéhiculaire est encore une fois d'assurer la création d'une carte locale dynamique avec la meilleure précision et dans les meilleurs délais. L'existence d'une carte locale dynamique permet donc de créer une connaissance partagée entre les véhicules présents dans le même environnement de conduite. Ce partage d'informations permet l'alimentation d'un modèle de prédiction des positions des véhicules. En effet, la prédiction s'articule autour de trois types de modèles : le modèle du véhicule, le modèle du conducteur et le modèle de changement de voie.

Le geste élémentaire de changement de voie constitue une sous-manœuvre importante dans d'autres manœuvres plus compliquées. En effet, c'est une manœuvre assez fréquente sur les autoroutes et dans les milieux urbains. Afin de mieux schématiser la procédure de changement de voie, nous énumérons dans la suite les manœuvres qui renferment une ou plusieurs manœuvres de changement de voie :

- Suivi par un véhicule rapide
- Insertion ou dégagement de voie pour un véhicule voulant s'insérer
- Sortie ou préparation de sortie
- Dépassement d'un véhicule lent
- Ajout/Suppression de voies

Ces manœuvres sont schématisées sur la figure 5.1.

En examinant ces manœuvres nous remarquons qu'elles font partie des gestes de conduite les plus compliqués et qui nécessitent le plus de vigilance et de concentration au niveau du conducteur et qui exigent le plus d'effort cognitif. Ces manœuvres peuvent être classées en trois catégories selon l'obligation de les exécuter :

- Obligé : sortie, insertion, suppression de voies
- Semi obligé : préparation de sortie, dégagement de voie pour un véhicule voulant s'insérer, suivi par un véhicule plus rapide.
- Facultatif : ajout d'une voie, dépassement d'un véhicule plus lent.

D'une autre part, on peut les classer selon le sens latéral de déplacement :

- A droite : sortie/préparation de sortie, suivi par un véhicule plus rapide
- A gauche : insertion ou dégagement en cas d'insertion, dépassement d'un véhicule plus lent
- Possible dans les deux sens : ajout/suppression de voie

Ces classifications suivant les causes, le sens et le degré d'obligation de la manœuvre permettent d'avoir une connaissance plus riche sur ces manœuvres. Pourtant le changement de voie reste une action assez complexe puisqu'elle dépend d'une multitude de facteurs :

- L'environnement de conduite : autoroute/urbain/rural, conditions climatiques, adhérence à la chaussée, condition du trafic, capacités d'accélération et de freinage du

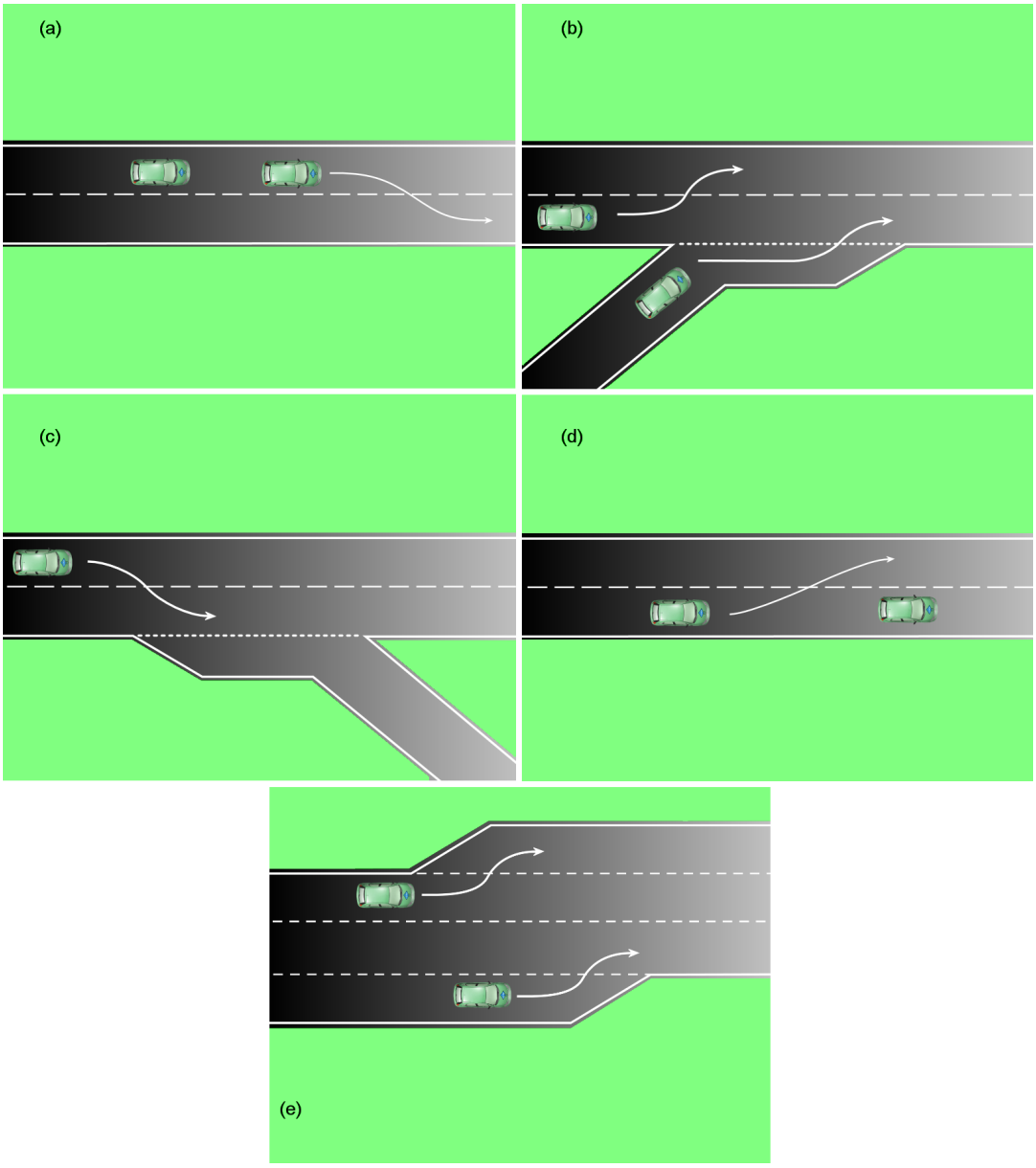

FIG. 5.1 – (a) Suivi par un véhicule plus rapide, (b) Insertion ou rabattement pour permettre une insertion, (c) Sortie ou préparation de sortie, (d) dépassement d'un véhicule plus lent, (e) Ajout ou suppression de voie

véhicule...

– Le profil de conduite : niveau de stress actuel du conducteur, type de conduite

habituel (agressif/calme), vitesse de braquage, temps accordé à la manœuvre, vitesse au début du changement de voie, respect du code de la route...

Comme nous pouvons le constater, la plupart de ces facteurs sont difficilement estimables car ce sont des facteurs personnels (car ils sont propres au véhicule et au conducteur) et dont l'identification nécessite un apprentissage dédié et contrôlé. Il est donc difficile de proposer un modèle universel de changement de voie.

5.3 Statistiques d'accidents

Les études statistiques de la sécurité routière permettent de quantifier le poids des accidents liés à des manœuvres de changement de voie. En effet, ceux-ci correspondent à 4% de la totalité des accidents sur la route au Pays-Bas d'après la SWOV [10] et entre 4 à 10% des accidents aux Etats-Unis selon plusieurs études menées dans [1, 3, 15]. D'autre part, les accidents durant un changement de voie coûtent 10% du temps de retard total sur les routes (environ 40 millions d'heures). Ceci est dû en grande partie à la forte probabilité de blocage de plusieurs voies pendant ce type d'accidents [2]. Or d'après l'étude faite dans [18], 78% d'accidents liés à cette manœuvre ont lieu à basse vitesse relative entre les véhicules (25 km/h). Cette faible vitesse réduit les exigences en terme de temps nécessaire pour alerter le conducteur et éviter le choc. Cette souplesse au niveau du temps de réaction ou d'alerte favorise l'utilisation d'un système de conduite coopérative. En effet les délais de communication entre les véhicules et la procédure de prise de décision seront par conséquent moins contraignants.

En examinant de près les types d'accidents, nous trouvons, selon [15], qu'environ 95% des accidents de changement de voie sont des chocs latéraux ou des chocs avec angle d'incidence. Le 5% restants sont des chocs-arrière purs. Ces statistiques montrent que la partie dangereuse d'un changement de voie est la période de franchissement de la ligne entre les voies. Une fois le véhicule installé sur la voie de destination, la probabilité de collision diminue considérablement. D'autres études s'intéressent aux causes des accidents durant une telle manœuvre. Selon [5], 75% des accidents de changement de voie sont dus à un déficit de connaissance du contexte routier par le conducteur. En d'autres termes, le conducteur ne perçoit pas l'autre véhicule que lorsque l'accident devient inévitable. La communication s'avère un moyen intéressant pour combler ce manque qualificatif d'information.

5.4 Les étapes de changement de voie

L'étude des étapes de changement de voie est importante puisqu'elle permet de repérer les paramètres qui permettent au système embarqué de détecter le début de la manœuvre

de changement de voie, d'estimer la durée de la manœuvre et par la suite de mieux prédire les futures positions du véhicule.

La classification des étapes de changement de voie se fait suivant la position latérale du véhicule par rapport à la ligne de marquage séparant la voie ou bien par rapport à la direction du braquage. En effet, selon [17], le changement de voie s'effectue en trois phases : une trajectoire rectiligne sur la voie d'origine, un passage par la ligne blanche entre les deux voies et finalement l'étape où le véhicule se redresse complètement sur la voie de destination. En revanche, [16] divise la procédure de changement de voie en deux étapes : le braquage volant du véhicule et la correction en appliquant un contre-braquage dans le sens opposé. Dans le même esprit, [13] propose un modèle à trois étapes : un braquage jusqu'à une certaine valeur maximale, la correction par contre-braquage et finalement l'étape de stabilité où l'angle du volant repasse par zéro pour regagner une trajectoire rectiligne. Plus explicitement, [20] propose une modélisation de l'angle du volant par une fonction sinusoïdale avec quatre phases suivant le signe du sinus et de sa dérivée par rapport au temps.

D'après le code de la route, tout changement de voie doit être bien signalé par l'instant d'activation du clignotant selon le sens de l'action. Donc a priori l'état du clignotant est un facteur décisif pour la détection du début du changement de voie. Selon des études menées par [4], 92% des manœuvres de changement de voies sont accompagnées de l'activation des clignotants, ce chiffre passe à 85.6% (sur les autoroutes) et 89.7% (en milieu urbain) selon [11]. En contrepartie, ce chiffre passe brusquement à 44.2% selon Lee et al [6]. En effet, ces chercheurs s'intéressaient au comportement naturel des conducteurs américains au volant en réduisant au minimum les interventions extérieures et les perturbations liées à l'expérimentation. Ils justifient leurs résultats en assurant que les statistiques antérieures ont été faussées par le sentiment du conducteur d'être observé durant les manipulations, ce qui le pousse à respecter beaucoup plus souvent le code de la route.

Ces résultats nous obligent donc à ne pas nous contenter de cet indicateur de changement de voie et à chercher d'autres indicateurs qui permettent de détecter le début du manœuvre afin de mieux la modéliser. Or, à part l'angle du volant et la position sur les voies cités auparavant, d'autres paramètres entrent en jeu lors d'un changement de voie comme l'accélération angulaire, l'angle des roues, l'utilisation des freins...

5.5 Système de décision de changement de voie

L'analyse de la manœuvre de changement de voie permet de constater que la manœuvre proprement dite est toujours précédée par une analyse de l'entourage du véhicule. Cette étape de recherche visuelle est faite dans le but d'alimenter un processus de décision interne au conducteur par des informations sur la sûreté de la manœuvre à venir. La figure suivante constitue un récapitulatif des étapes de recherche avant la manœuvre.

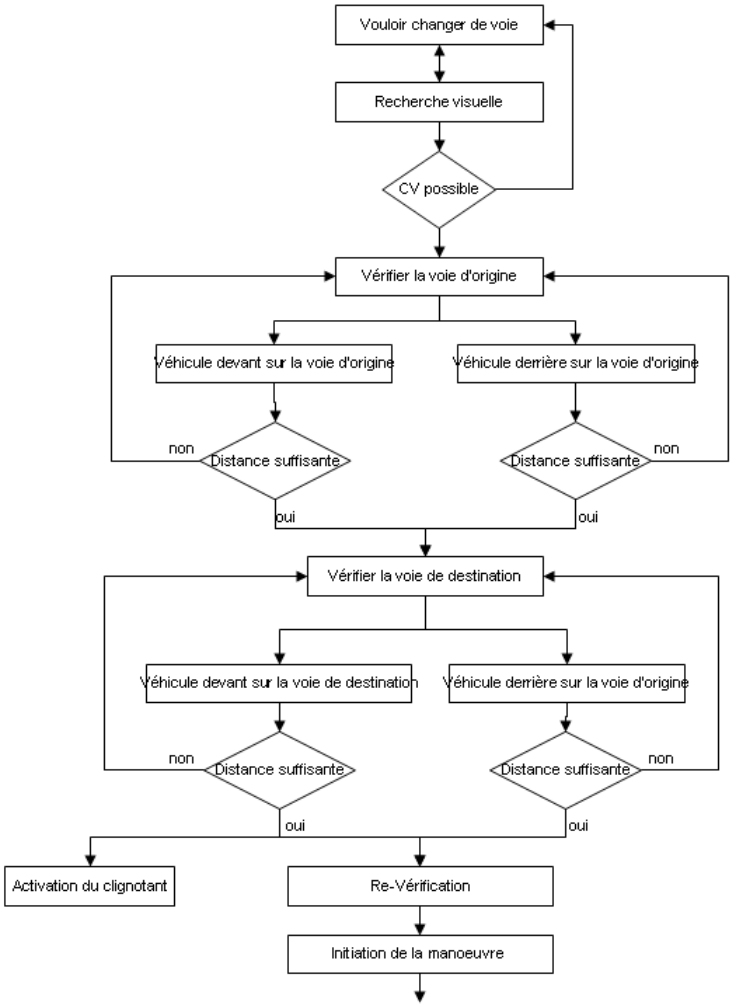

FIG. 5.2 – Système de décision interne au conducteur

Comme illustré sur la figure précédente, le risque de collision vient en général de quatre véhicules : ceux qui nous précèdent et ceux qui nous suivent sur les deux voies d'origine et de destination. Le conducteur est alors invité avant de procéder à un changement de voie de vérifier que les marges respectives entre son véhicule et ces quatre véhicules sont suffisantes. D'une manière fonctionnelle, l'étape qui précède la prise de décision par le conducteur peut être divisée en plusieurs parties :

1. Détection des véhicules sur les voies d'origine et de destination.
2. Estimation des profils de conduite de chaque véhicule.
3. Estimation de notre trajectoire lors d'un changement de voie.

4. Estimation du risque de collision entre notre véhicule et les véhicules sur les deux voies d'origine et de destination.
5. Prise de décision

Ce processus de détection, d'estimation et de prise de décision peut trouver un appui important en présence d'une carte dynamique de l'environnement. Les informations figurant sur cette carte locale sont utilisées pour prédire les positions des véhicules. Selon ces prédictions, nous estimons le risque de collision des éventuelles trajectoires. En se basant sur la carte locale dynamique, le calcul du risque par notre système se fait en parallèle avec le processus habituel interne du conducteur. Le niveau de risque estimé sera communiqué au conducteur sous la forme d'un indicateur pour le guider dans sa phase de prise de décision pour effectuer ou non la manœuvre.
Dans le cas d'une prise de décision qui ne tient pas compte de l'indicateur ou dans le cas d'apparition du danger après le début de la manœuvre, la désignation du véhicule source de danger peut aider le conducteur à mieux corriger sa manœuvre. Notre système ne va pas jusqu'au proposer une correction optimale pour contourner le risque. Cette correction relève plus du domaine du contrôle du véhicule. A noter tout de même, qu'une étude sur la gestion du risque est intéressante dans ce cas puisque la réaction idéale du conducteur peut être totalement différente selon la position et le profil du véhicule avec lequel se présente le risque.

Dans notre étude, nous allons supposer que le risque avec chacun des véhicules environnants est indépendant. Cette supposition n'est pas tout à fait réaliste puisque, a priori, la présence de plusieurs risques de collision augmente considérablement le risque surtout que dans ce cas les manœuvres pour contourner l'obstacle peuvent s'avérer plus risquées. Par contre, Cette indépendance nous permet de calculer séparément les indices de risque de collision avec chacun des quatre véhicules environnants.

5.6 Modélisation de la manœuvre du changement de voie

Comme vue précédemment, l'estimation du risque de collision durant une manœuvre de changement de voie nécessite la prédiction dans un horizon temporel prédéfini de l'ensemble des positions des véhicules dans l'environnement de conduite. Le véhicule qui change de voie nécessite une étude spéciale pour modéliser d'une façon réaliste son déplacement. Cette modélisation peut être faite selon deux approches :

- Modélisation géométrique : la trajectoire du véhicule est modélisée par une fonction mathématique (ou un ensemble concaténé de fonctions mathématiques). Cette trajectoire doit répondre aux exigences réalistes de la manœuvre. L'avantage de cette

méthode est qu'elle est plus rapide à exécuter ; en revanche elle peut aboutir à des comportements qui ne peuvent pas être réalisés par un véhicule. Pour modéliser géométriquement la trajectoire durant un changement de voie, la littérature montre souvent des approches utilisant des modèles polynomiales de cinquième degré [7, 9].

– Modélisation dynamique : le comportement du véhicule est modélisé par un ensemble d'équations dynamiques. Le modèle ainsi proposé peut varier entre un modèle simpliste et un modèle de comportement raffiné au détriment de la complexité des équations et du temps de calcul [12].

Nous avons choisi de proposer un modèle mixte de la trajectoire. Ainsi nous proposons, dans un premier temps, un modèle géométrique polynomiale. Les composantes longitudinales et latérales de la trajectoire (par rapport au sens de déplacement) sont souvent modélisées avec des polynômes de cinquième degré. Le choix d'un polynôme de cinquième degré assure un comportement de troisième degré pour les accélérations longitudinale et latérale. Une fonction de troisième degré constitue le degré minimal qui peut assurer un comportement réaliste des deux composantes de l'accélération. Donc la position du véhicule doit suivre une fonction de cinquième degré suivant la direction longitudinal X et latéral Y. La figure 5.3 montre un exemple de changement de voie type par rapport à un système d'axes de référence [X,Y] ; X(t) et Y(t) auront donc les formules suivantes en fonction du temps t ;

$$X(t) = A_5t^5 + A_4t^4 + A_3t^3 + A_2t^2 + A_1t + A_0 \tag{5.1}$$

$$Y(t) = B_5t^5 + B_4t^4 + B_3t^3 + B_2t^2 + B_1t + B_0 \tag{5.2}$$

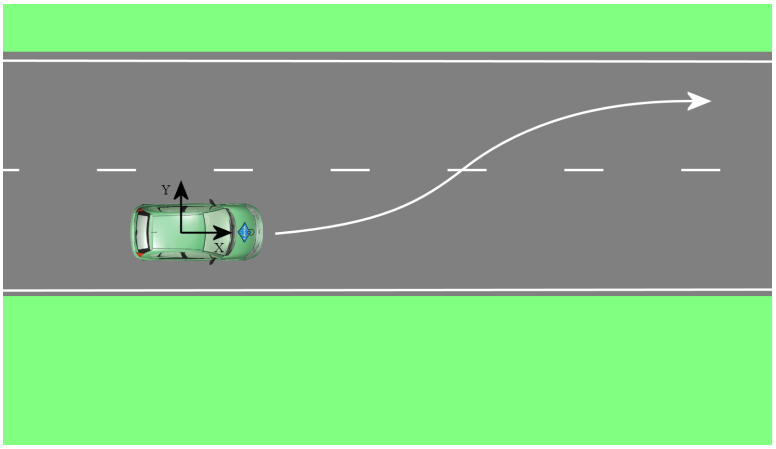

FIG. 5.3 – Exemple d'un changement de voie

Dans le but de résoudre ce système, nous proposons des contraintes d'ordres géométrique et cinématique qui peuvent rapprocher la forme de la fonction d'un changement de

	Longitudinale	Latérale
Position	$X_{initial} = 0$	$Y_{initial} = 0$ $Y_{final} = \Delta L$
Vitesse	$\dot{X}_{initial} = \dot{X}_{final} = V = Cte$	$\dot{Y}_{initial} = \dot{Y}_{final} = 0$
Accélération	$\ddot{X}_{initial} = \ddot{X}_{final} = 0$	$\ddot{Y}_{initial} = \ddot{Y}_{final} = 0$

TAB. 5.1 – Les conditions aux limites dans un changement de voie

voie typique. Comme première contrainte, nous supposons qu'avant de changer de voie, le véhicule roule d'une façon rectiligne sur la voie d'origine avec une vitesse constante et une accélération nulle. La vitesse latérale est supposée nulle puisque le mouvement est rectiligne. A l'instant zéro, le conducteur commence à manœuvrer pour changer sa voie. L'accélération et la vitesse latérales commencent à augmenter. Le véhicule regagne la position finale sur la voie de destination avec une vitesse longitudinale constante et égale à la vitesse de début de la manœuvre. A la fin de la manœuvre, nous supposons que le véhicule regagne un profil normal de conduite, c'est à dire que les accélérations longitudinale et latérale sont nulles ainsi que la vitesse latérale. Ces conditions aux limites sont récapitulées dans le tableau 5.1 :

Afin de faciliter le calcul analytique, nous supposons qu'au début de la manœuvre, le véhicule était en position [0,0] au milieu de la voie d'origine. A la fin de la manœuvre, le véhicule s'installe aussi au milieu de la voie adjacente, c'est-à-dire à une distance latérale ΔL de la position initiale. ΔL est considéré comme la largeur d'une voie. Ces conditions aux limites fournissent 5 équations sur la direction longitudinale pour les six inconnus A_i et 6 équations sur la direction latérale pour les 6 inconnus B_i. Le système sous déterminé de $X(t)$ aura la solution suivante paramétrée par m :

$$X(t) = \frac{3}{5}\frac{m}{\Delta T^2}t^5 - \frac{3}{2}\frac{m}{\Delta T}t^4 + mt^3 + Vt \tag{5.3}$$

ΔT étant la durée de la manœuvre et V est la vitesse longitudinale au début de la manœuvre. Si nous examinons le comportement de la courbe suivant la direction X par rapport à la valeur de m, nous pouvons distinguer deux types de forme de la courbe :

- Pour m<0 : le véhicule commence par diminuer sa vitesse au début de la manœuvre puis accélère dans la deuxième phase après le passage sur la ligne blanche. Ce genre de comportement correspond à des manipulations de préparation de sortie, sortie d'autoroutes ou insertion...
- Pour m>0 : le véhicule commence la manœuvre en accélérant puis décélère pour regagner la voie de destination avec la même vitesse du début. Ce profil correspond plutôt à un dépassement, un dégagement de voie...

Suivant la direction Y, le système $Y(t)$ aura la solution suivante :

$$Y(t) = 6\frac{\Delta L}{\Delta T^5}t^5 - 15\frac{\Delta L}{\Delta T^4}t^4 + 10\frac{\Delta L}{\Delta T^3}t^3 \tag{5.4}$$

où ΔL désigne la largeur de la voie franchie.
En revanche, l'utilisation d'une approche purement géométrique et sans prendre en compte le modèle de comportement du véhicule peut aboutir à des trajectoires irréalistes et par la suite à des prédictions erronées de la position du véhicule en changement de voie. Pour limiter l'ensemble des solutions géométriques à des formes acceptables, nous imposons des contraintes dynamiques sur les trajectoires obtenues. Nous avons choisi trois contraintes :

- L'accélération latérale est toujours inférieure à une valeur nominale $a_{lat-max}$. Nous prenons une valeur nominale de 4 m/s^2.
- L'accélération longitudinale est inférieure à une accélération de confort $a_{long-max}$ estimé normalement à $2g$.
- La décélération longitudinale est inférieure en valeur absolue à la décélération maximale du véhicule $a_{Frein-max}$. Dans des conditions nominales d'adhérence, $a_{Frein-max}$ est estimée à $0.8g$.
- La vitesse longitudinale maximale est inférieure à la vitesse maximale autorisée sur la route autorisée.
- La vitesse longitudinale est toujours positive : le véhicule est toujours en train d'avancer dans la direction longitudinale ; il ne s'arrête pas et ne recule pas ($V > 0$).
- La courbure : Afin d'obtenir des trajectoires lisses nous avons fait le choix de minimiser la courbure maximale de la fonction $Y = f(X)$.

5.6.1 Accélération latérale

L'expression de la l'accélération latérale est obtenue par dérivation de l'équation 5.4. On peut démontrer que l'extremum de la fonction de l'accélération sera inférieur à la valeur de $a_{Lat-max}$ lorsque :

$$\Delta T > k\sqrt{\frac{\Delta L}{a_{Lat-max}}} \tag{5.5}$$

où $k = 2.4025$

Si nous prenons une valeur nominale de la largeur de voie égale à $3.5m$ et une valeur maximale de l'accélération latérale égale à $4m/s^2$, on obtient :

$$\Delta T > 2.24sec$$

Donc la manœuvre de changement de voie ne doit pas durer moins que $2.24sec$. Et si nous raisonnons en terme de confort pour les passagers, nous devons prendre la valeur

nominale de l'accélération latérale de confort de $2m/s^2$, donc ΔT sera égale dans ce cas à $3.17sec$.

Ainsi, d'après la borne exigée sur l'accélération latérale, nous avons réussi à obtenir une borne inférieure pour la durée de la manœuvre de changement de voie. Néanmoins, la détermination de la valeur de ΔT est beaucoup plus compliquée dans des vraies situations. En effet, ΔT est fortement dépendante du profil de conduite, de l'environnement de conduite, des capacités du véhicule et du contexte de la manœuvre. Cette dépendance ne rend pas facile la détermination de ΔT. De plus, et selon une étude comparative faite dans [6] de plusieurs études statistiques visant à estimer ce paramètre, nous remarquons une grande diversité des valeurs obtenues. Malgré cette diversité une valeur moyenne de 5 secondes surgit. Ainsi cette valeur est obtenue par [14] à partir d'une étude statistique ; et une autre étude faite sur simulateur [8] a permis de constater une valeur moyenne de 5.14 sec. Dans la suite de cette étude nous allons adopter cette valeur nominale comme base pour la détermination d'une trajectoire réaliste de changement de voie.

5.6.2 Vitesse

Selon l'expression de la vitesse longitudinale $\ddot{X}(t)$, l'extremum est obtenu pour les temps $t = 0, \frac{\Delta T}{2}$ et ΔT. Ceci est trivial pour ΔT et 0 qui correspondent aux instants triviaux de début et de fin de la manœuvre. Ainsi, la seule valeur intéressante à étudier sera pour $t = \frac{\Delta T}{2}$. Si $m > 0$, ce moment correspond à un maximum de vitesse. Respectivement il correspond à un minimum pour $m < 0$. Ainsi, si nous bornons la vitesse selon le critère (0<V<Vmax)

$$\dot{X}(\frac{\Delta T}{2}) < V_{max} \quad pour \quad m > 0 \Rightarrow m < \frac{16}{3}\frac{V_{max} - V_0}{\Delta T^2} \tag{5.6}$$

et,

$$\dot{X}(\frac{\Delta T}{2}) > 0 \quad pour \quad m < 0 \Rightarrow m > -\frac{16}{3}\frac{V_0}{\Delta T^2} \tag{5.7}$$

Nous obtenons alors des contraintes sur les valeurs possibles de m :

$$-\frac{16}{3}\frac{V_0}{\Delta T^2} < m < \frac{16}{3}\frac{V_{max} - V_0}{\Delta T^2} \tag{5.8}$$

5.6.3 Accélération longitudinale

Nous examinons maintenant les contraintes relatives à l'accélération longitudinale dont l'expression est :

$$\ddot{X}(t) = 12m\frac{t^3}{\Delta T^2} - 18m\frac{t^2}{\Delta T} + 6mt \tag{5.9}$$

Cette fonction de troisième degré en fonction du temps doit satisfaire les conditions suivantes :

$$a_{Frein-max} < \ddot{X} < a_{Long-max};\ pour\ 0 < t < \Delta T \tag{5.10}$$

$\ddot{X}(t)$ possède un extremum pour les valeurs de $t = (1 \pm \frac{1}{\sqrt{3}})\frac{\Delta T}{2} = \alpha_{1,2}\frac{\Delta T}{2}$. où

$$\alpha_1 = (\frac{1}{\sqrt{3}})\ et\ \alpha_2 = (-\frac{1}{\sqrt{3}}).$$

Ces deux solutions sont bien à l'intérieur de l'intervalle étudié $[0, \Delta T]$.

Les extremums de $\ddot{X}(t)$ sont obtenus pour ces valeurs de t, soit :

$$\ddot{X}(t) = 3m\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_{1,2}^3 - \frac{3}{2}\alpha_{1,2}^2 + \alpha_{1,2}) \tag{5.11}$$

Pour voir si ces extremums correspondent à des minimas ou à des maximas, nous calculons la dérivée :

$$\dddot{X}(\alpha_{1,2}\frac{\Delta T}{2}) = \frac{36m}{\Delta T}(\alpha_{1,2} - 1) \tag{5.12}$$

Nous obtenons alors deux profils d'accélération suivant les valeurs de m :

- si $m > 0$: α_1 correspond à un maximum local et α_2 correspond à un minimum local. Ceci se traduit par un profil de conduite où le véhicule accélère au début puis décélère. D'après l'équation 5.12, m aura donc la valeur maximale suivante :

$$m < min(\frac{a_{Long-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_1^3 - \frac{3}{2}\alpha_1^2 + \alpha_1)}, \frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_2^3 - \frac{3}{2}\alpha_2^2 + \alpha_2)}) \tag{5.13}$$

- si $m < 0$: le comportement est inverse. m aura donc une borne inférieure.

$$m > max(\frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_1^3 - \frac{3}{2}\alpha_1^2 + \alpha_1)}, \frac{a_{Long-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_2^3 - \frac{3}{2}\alpha_2^2 + \alpha_2)}) \tag{5.14}$$

En général l'accélération maximale de freinage est inférieure, en valeur absolue, que l'accélération longitudinale maximale. Par suite l'intervalle de validité de m sera donc :

$$\frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_1^3 - \frac{3}{2}\alpha_1^2 + \alpha_1)} < m < \frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_2^3 - \frac{3}{2}\alpha_2^2 + \alpha_2)} \tag{5.15}$$

En combinant les deux contraintes sur la vitesse et l'accélération longitudinales, nous obtenons un nouvel intervalle pour le paramètre m :

$$max(\frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_1^3 - \frac{3}{2}\alpha_1^2 + \alpha_1)}, -\frac{16}{3}\frac{V_0}{\Delta T^2}) < m \tag{5.16}$$

et

$$m < min(\frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_2^3 - \frac{3}{2}\alpha_2^2 + \alpha_2)}, \frac{16}{3}\frac{V_{max} - V_0}{\Delta T^2}) \tag{5.17}$$

Donc si nous prenons la vitesse maximale $V_{max} = 130km/h$ et $V_0 = 90km/h$ nous obtenons :

$$\frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_1^3 - \frac{3}{2}\alpha_1^2 + \alpha_1)} = -3.01 \tag{5.18}$$

$$\frac{a_{Frein-max}}{3\Delta T(\frac{1}{2}\alpha_2^3 - \frac{3}{2}\alpha_2^2 + \alpha_2)} = 0.445 \tag{5.19}$$

$$-\frac{16}{3}\frac{V_0}{\Delta T^2} = -5.33 \tag{5.20}$$

$$\frac{16}{3}\frac{V_{max} - V_0}{\Delta T^2} = 2.36 \tag{5.21}$$

Nous remarquons par conséquent que les contraintes sur les accélérations longitudinales sont plus restreintes que les limites sur les vitesses maximales et minimales. Par conséquent, dans le même exemple nous pouvons prendre :

$$-3.01 < m < 0.455$$

5.6.4 Courbure

La courbure de la trajectoire à effectuer est un facteur très important pour le réalisme de la manœuvre planifiée. Par contre la formule analytique de la courbure dans notre cas est si compliquée que l'extraction direct des bornes de validation de m est difficile. Pour remédier à cela, nous avons étudié l'ensemble des courbes paramétrées par la valeur de m balayant l'intervalle [-3.01, 0.455]. La figure 5.4 montre que la trajectoire est plus raide (c'est à dire la courbure est plus grande) avec des valeurs faibles de m. Donc, la valeur de $m = 0.455$ assure une courbure minimale de la trajectoire $Y = f(X)$.

La figure 5.5 montrent les formes de de $X, Y, \dot{X}, \dot{Y}, \ddot{X}, \ddot{Y}$ pour des valeurs de $m = 0.455$, $V_0 = 90km/h$, $\Delta L = 3.5m$ entre les valeurs de $t = 0$ et $t = 5sec$.

5.6.5 Validation expérimentale

Afin de valider notre modèle et pour pouvoir l'utiliser dans nos expérimentations de prévention de risque, nous avons effectué une série d'acquisitions de conduite normale sur des autoroutes. La figure 5.7 montrent la trajectoire de notre véhicule durant les tests. A partir de ces acquisitions, nous avons extrait les parties où la conducteur effectue un changement de voie. Nous avons choisi, conformément au modèle, d'extraire les parties de trajectoires qui succèdent le déclenchement de l'un des feux clignotants. A titre d'exemple, nous montrons sur la figure 5.6 le changement de l'angle du volant durant une manœuvre

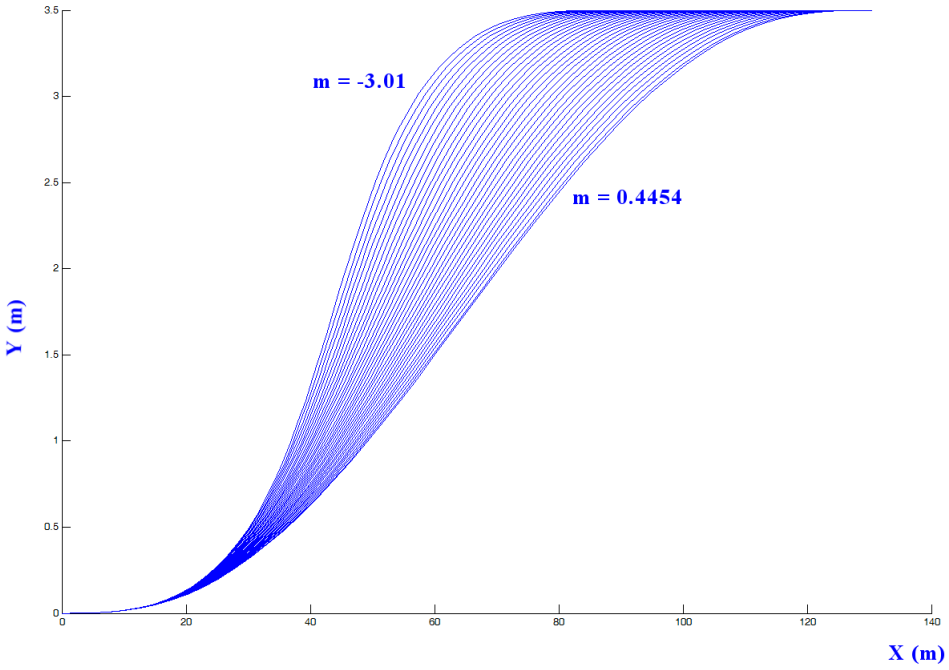

FIG. 5.4 – La trajectoire paramétrée entre les deux limites acceptables de m

réelle de changement de voie. Le signal en créneaux rouges désigne l'activation du clignotant. Le signal en bleu désigne l'angle du volant. Nous pouvons bien remarquer que cet angle a l'allure d'une sinusoïde complète avec retour à la fin de la manœuvre à la valeur initial du début.

Dans tout le reste de l'étude, la durée de la manœuvre est supposée constante et égale à 5 sec. Pour ces tests, nous avons éliminé, en utilisant une base cartographique, les manœvres de sortie et d'insertion accompagnées de l'activation des feux clignotants. La figure 5.8 illustre quelques cas de changement de voie. L'allure de ces trajectoires paraît proche de notre modèle de déplacement. La trajectoire extraite est ensuite transformée dans le repère direct [X,Y] du véhicule (X pointant dans la direction de déplacement du véhicule). La figure 5.9 montre une superposition d'un ensemble de ces manœuvres. Sur le fond de cette figure, nous illustrons la zone des trajectoires qui contient les différentes courbes de notre modèle.

Nous remarquons sur la figure 5.9 que les trajectoires réelles sont incluses la plupart du temps dans les limites de notre modèle. Notons aussi que les deux axes sur la figure n'ont pas la même échelle. Cette représentation permet de fournir une idée plus claire sur

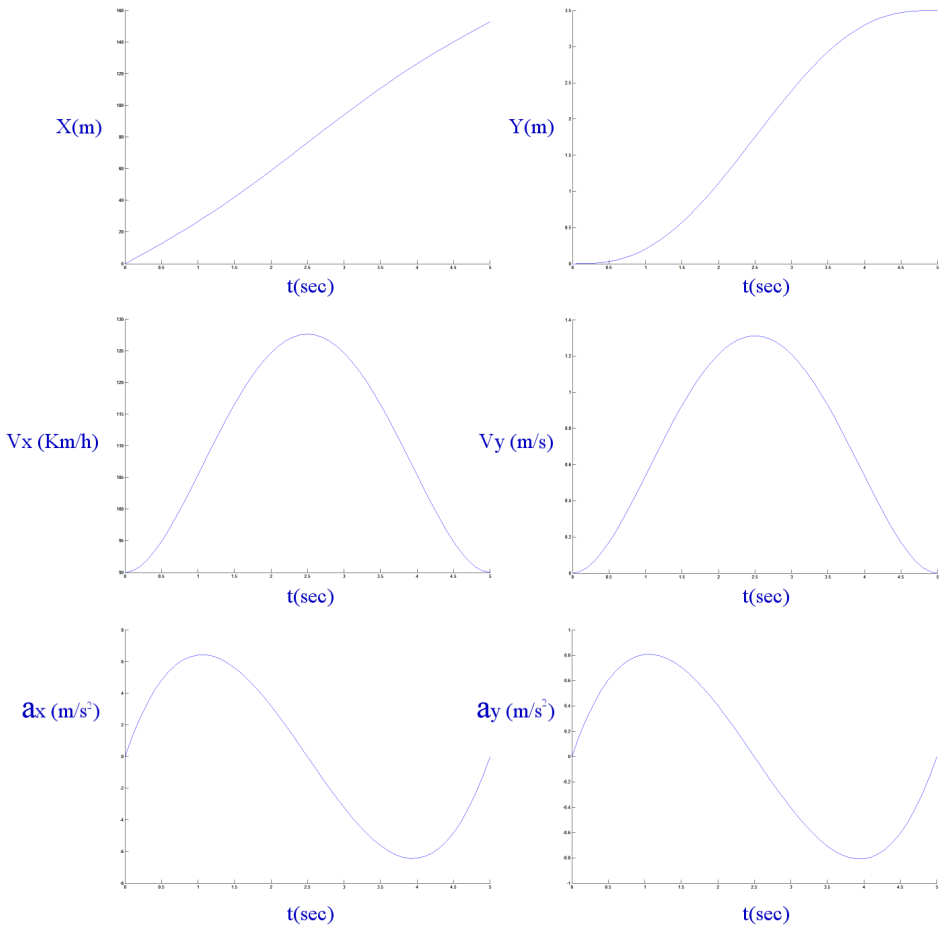

FIG. 5.5 – De haut en bas, de gauche à droite, les profils X et Y, Les vitesses selon X et Y, les accélérations longitudinale et latérale

le comportement des trajectoires sur les deux axes de mouvement. Cette non-concordance nous permet de constater que la zone la plus importante sur la figure est la zone centrale qui doit, a priori couvrir la totalité de la trajectoire et, où les trajectoires expérimentales coïncident le plus avec notre modèle. D'autre part, ce sont les débuts et les fins des manœuvres qui dépassent les limites de notre modèle. ce dépassement peut être dû à plusieurs raisons :

- Le changement latéral de position ne correspond pas toujours à la largeur nominale de la voie. Il faut intégrer dans le modèle ce paramètre à partir des bases de données cartographiques.

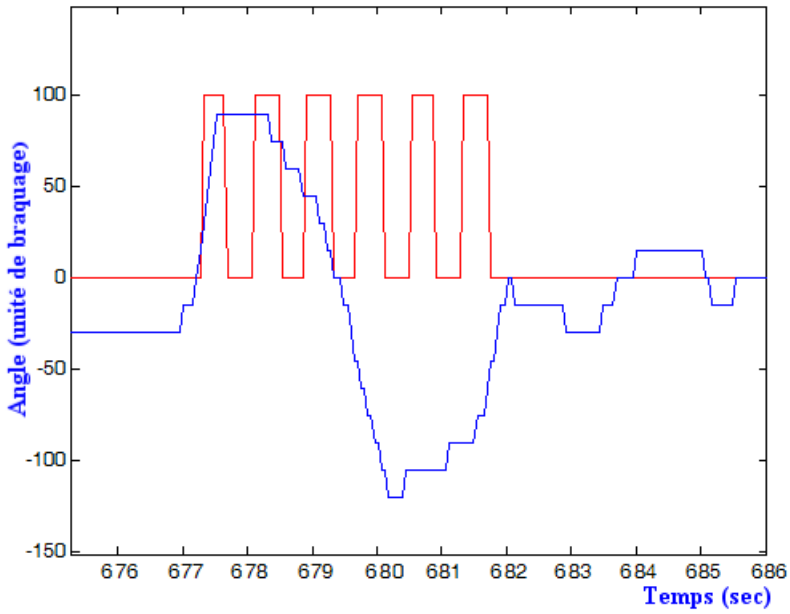

FIG. 5.6 – En rouge, le signal du feu clignotant et en bleu l'angle de braquage durant le changement de voie

- La fin de la manœuvre ne se termine pas toujours avec souplesse sur la voie de destination. Parfois, le conducteur exagère son angle de volant et dépasse la limite du milieu de la voie de destination.
- Le comportement du conducteur durant le changement de voie peut être influencé (voire perturbé) par le mouvement des véhicules autour de son véhicule.
- Le changement de voie n'est pas toujours un acte totalement planifié. Un changement de voie peut parfois être suivi par (ou combiné avec) une autre manœuvre de conduite.

5.7 Estimation du risque de collision

De même que dans le cas de la gestion des interdistances présenté dans la chapitre 4, le risque de collision est calculé entre le véhicule qui effectue la manœuvre et les véhicules voisins sur la base d'un horizon de déplacement prédit. Vue la durée relativement élevée (de 5 sec) prévue pour terminer le changement, nous prédisons les trajectoires des différents véhicules dans un horizon temporel large de 10 sec. Cette grande durée de prédiction nous permet non seulement de prévoir un choc pendant la manœuvre, mais il permet aussi de

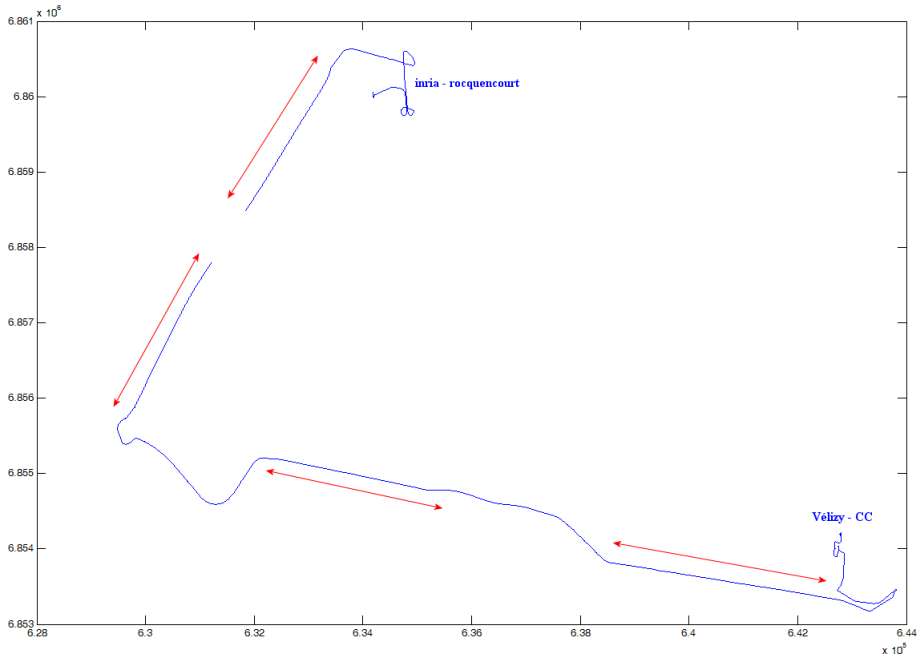

FIG. 5.7 – L'une des trajectoires du véhicule sur les autoroutes durant l'acquisition des exemples de changement de voie

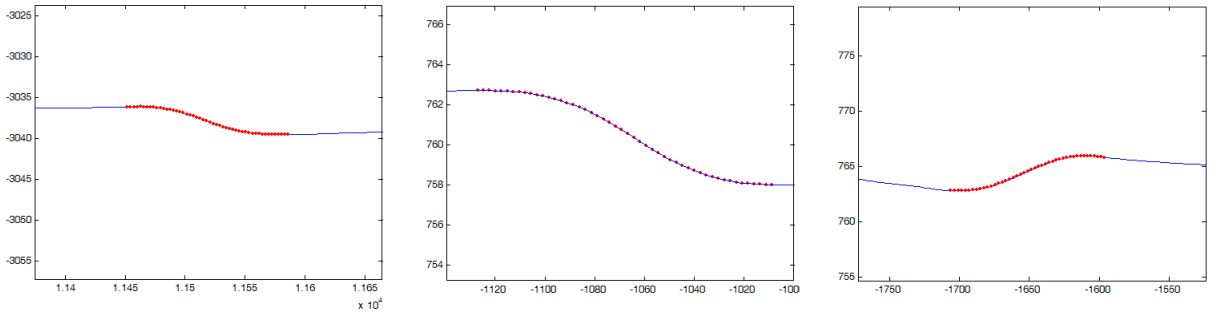

FIG. 5.8 – Des exemples de trajectoires de manœuvres de changement de voie

s'assurer que la prise de position sur la voie de destination ne va pas entraîner des conflits de trajectoire même après l'achèvement de la manœuvre. Pratiquement, nous calculons l'horizon de déplacement en considérant que le mouvement des véhicules (autres que le

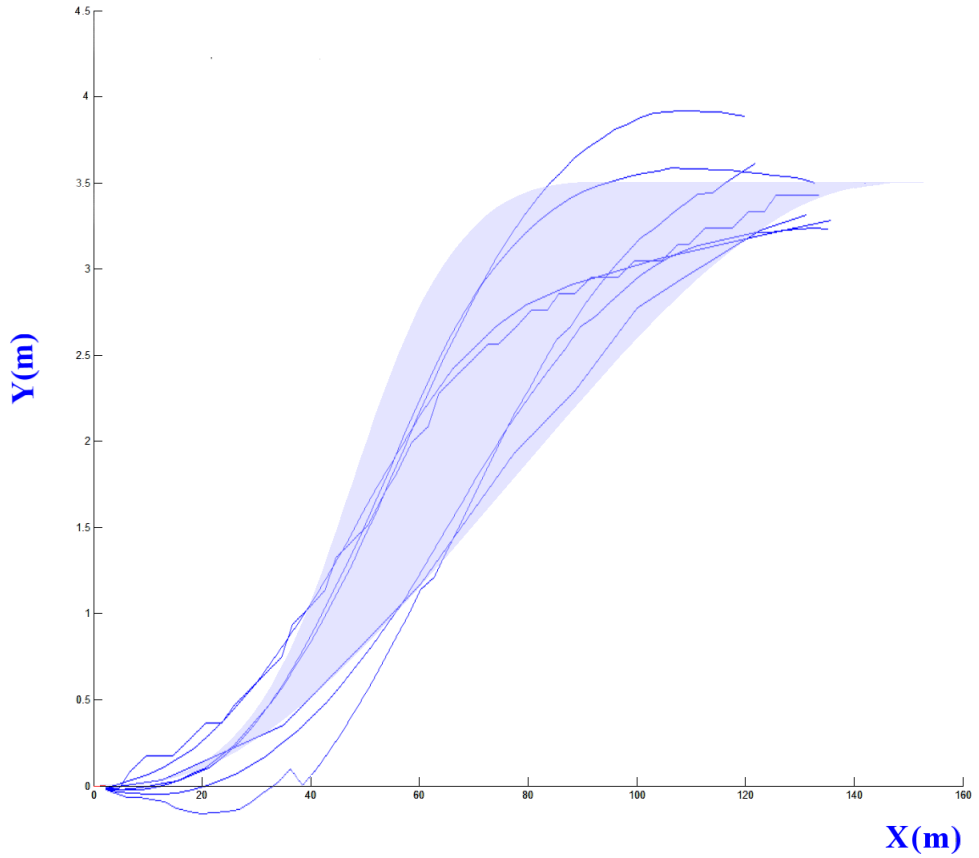

FIG. 5.9 – Les trajectoires réelles de changement de voie en comparaison avec la zone de couverte par notre modèle

véhicule qui effectue le changement de voie) est rectiligne. Cette supposition reste valable dans le cas d'une conduite sur autoroute où les changements de voie s'effectuent généralement sur des tronçons rectilignes de routes. Tandis que pour le véhicule en changement de voie, nous appliquons le modèle déjà établi dans ce chapitre durant les 5 premières secondes de prédiction. Nous supposons ensuite que le véhicule reprend une trajectoire rectiligne sur la voie de destination avec la même vitesse de fin de la manœuvre.

Sur la trajectoire prédite, nous modélisons la position géométrique du véhicule par l'ensemble des cercles d'incertitudes déjà décrits dans le paragraphe 4.2.5.
La collision est ainsi détectée si au moins deux cercles de véhicules différents entrent en contact.

5.8 Indice de risque

Le rôle de cet indicateur de risque est d'assister le conducteur en état de prise de décision pour un changement de voie. Il est censé lui donner une estimation de la dangerosité de la situation si la manœuvre est effectuée à l'instant actuel. Mais lors d'un changement de voie, et contrairement au cas de la gestion des intersections, la simple possibilité de collision, même après un horizon temporel assez grand, suffit pour convaincre le conducteur de renoncer à cette manœuvre ou de la reporter ultérieurement quand le risque sera néant.

Pour ceci, notre indicateur de risque jouera le rôle d'un détecteur de collision. Il est ainsi défini comme un indice à trois niveaux communiqué au conducteur. les trois niveaux de cet indice sont donc :

1. Niveau (1) sans risque : lorsqu'il y n'a aucune collision possible avec les autres véhicules. Les trajectoires prédites des véhicules ne s'entrecoupent jamais dans l'horizon étudié et les véhicules ne doivent pas connaître de collision entre eux.
2. Niveau (2) de risque moyen : la collision est détectée sur la voie de destination après l'accomplissement de la manœuvre. Malgré cette détection de collision, les différents véhicules disposent toujours d'un temps suffisant ($> 5sec$) pour prendre conscience du risque présent et gérer sainement la transition vers la nouvelle configuration des véhicules après le changement de voie.
3. Niveau (3) de risque élevé : ce risque correspond à une situation de collision pendant l'exécution de la manœuvre de changement de voie. Avec ce niveau de risque, le conducteur ne doit pas entreprendre ce changement en ce moment puisque le risque de collision est assez proche temporellement et spatialement. Le système continuera à estimer le risque d'une manière continue en supposant que l'instant actuel est l'instant de début de la manœuvre de changement de voie. Le conducteur doit ainsi attendre que l'indice de risque passe au moins au niveau 2 pour procéder à sa manœuvre.

5.9 Expérimentations

Nous avons effectué des séries de tests de changement de voie, sur les autoroutes A13, A6 et sur le site de l'Inria Recquencourt. Dans la suite, nous allons présenter un scénario effectué à l'Inria avec deux véhicules *Lara* communicants.

Sur les figures 5.10 et 5.11, nous montrons les paramètres des deux véhicules. Ceux de *Lara1* comme enregistrés on-board et ceux de *Lara2* comme reçus par *Lara1*.

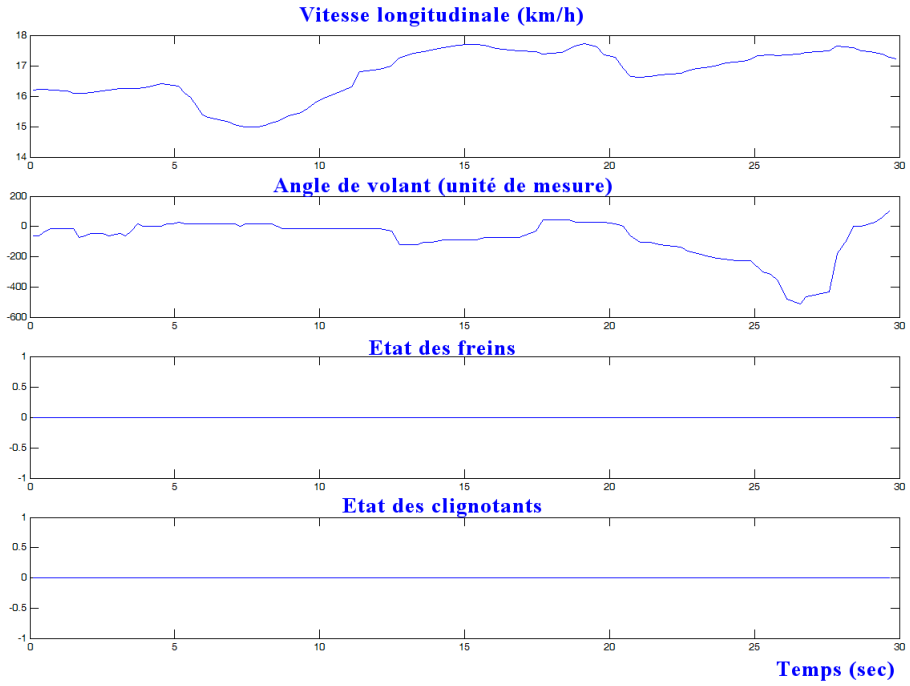

FIG. 5.10 – De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara1* pendant le test

Nous remarquons sur la figure 5.10 que *Lara1* donne un clignotant gauche et commence aussitôt la manœuvre de changement de voie comme apparu sur la forme de la courbe représentant l'angle du volant. A partir du profil de la vitesse longitudinale, nous remarquons aussi que ce changement de voie se fait à une vitesse quasi-constante.
Les paramètres de *Lara2* montrent que ce véhicule continue sa trajectoire avec le même profil sans changement.

Sur la figure 5.12, nous illustrons les trajectoires respectives des deux véhicules. En bleu, c'est l'historique du déplacement de *lara1* jusqu'à l'instant $t_0 = 10sec$ et les points en rouge représentent celui de *lara2*. L'horizon de déplacement de 10 sec de *lara1* est représenté par les points verts. Cette trajectoire est divisée en deux parties : les 5 premières secondes sont consacrées à la manœuvre de changement de voie et les dernières 5 sec, le véhicule est supposé en trajectoire rectiligne. L'horizon de *lara2* en trajectoire rectiligne est représenté par les points en magenta.

Si nous examinons le TTC illustré sur la figure 5.13, nous remarquons que le système

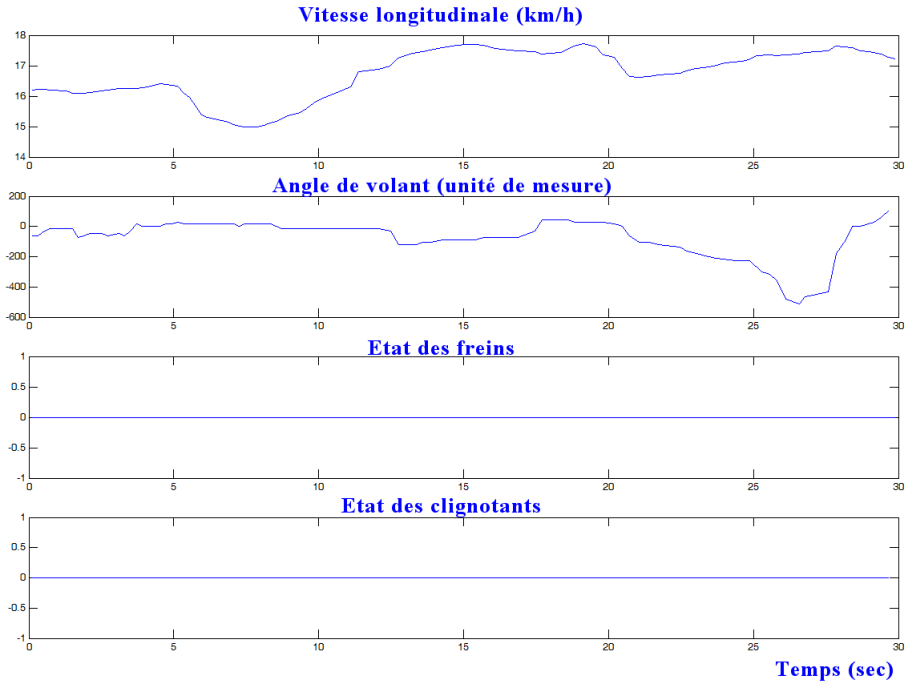

FIG. 5.11 – De haut en bas, la vitesse longitudinale, l'angle du volant, l'état des freins et l'état des feux clignotants sur *Lara2* comme reçu par *Lara1* pendant le test

a détecté un risque de collision jusqu'à l'instant t_0. Ce temps de collision est estimé à 5.5 sec, c'est à dire après la fin de la manœuvre, le risque sera donc d'un niveau moyen. Même si ce risque n'est pas communiqué au conducteur, celui-ci a décidé de commencer sa manœuvre au même moment où le risque de collision a chuté au niveau sûr.

Cette expérience constitue un exemple des expérimentations que nous avons effectuées dans plusieurs sites, où nous avons utilisés notre système d'aide au changement de voie.

Toutefois, nous avons remarqué que la précision du GPS est un facteur assez important dans ce type d'application. Même que toute notre analyse ne prend pas en compte la disposition des véhicules sur les lignes et elle se base uniquement sur la prédiction des trajectoires, une mauvaise localisation du véhicule sur les voies peut amener à une mauvaise prédiction du déplacement latéral. Cette prédiction latérale de qualité médiocre peut amener à des fausses détections ou à des non-détections de collision.

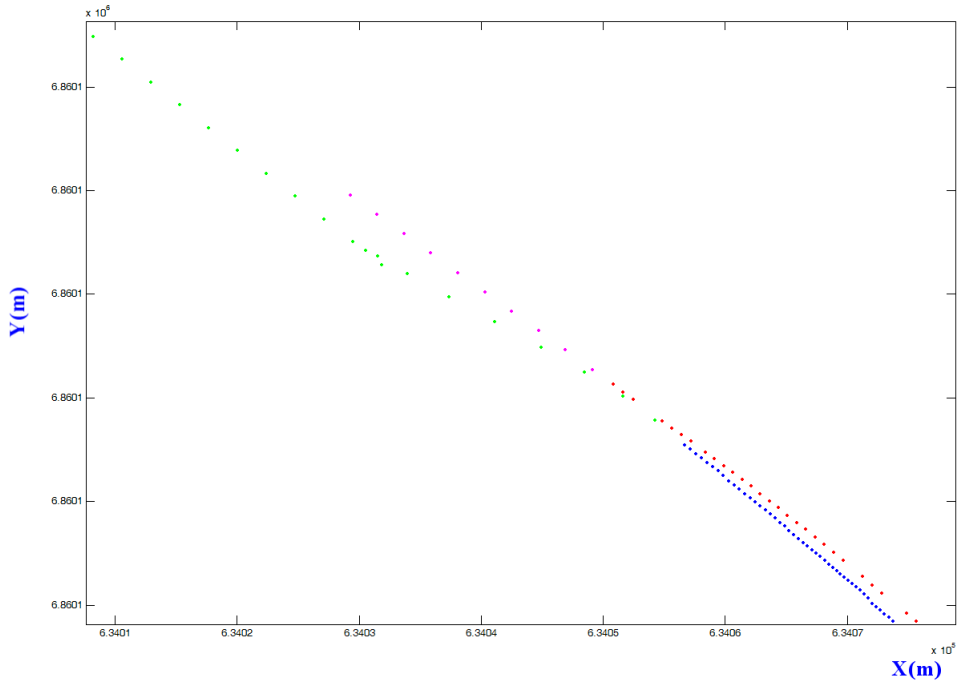

FIG. 5.12 – En bleu (resp. en rouge), l'historique de déplacement de *Lara1* (resp. *Lara2*). En vert,(resp. en magenta), la prédiction de déplacement de *Lara1* (resp. *Lara2*)

5.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre approche d'utilisation de la communication entre les véhicules pour assister la décision du conducteur lors d'un changement de voie. Notre méthode consiste à prédire un horizon de déplacement pour les différents véhicules et de détecter la possibilité de collision entre ceux-ci. Afin de prédire le mouvement du véhicule pendant le changement de voie, nous proposons un modèle géométrique de cette manœuvre par des fonctions polynomiales de cinquième degré avec des contraintes sur le comportement dynamique du véhicule pour rendre le modèle plus réaliste.

Durant les tests que nous avons effectués sur les véhicules *lara*, nous avons pu constater que le modèle proposé couvre une bonne partie des manœuvres mesurées.
Toutefois, un modèle réaliste du comportement des véhicules lors d'un changement de voie nécessite une étude plus poussée pour tenir compte des paramètres dynamiques du véhicule, du type de conduite du conducteur, et de la nature de l'environnement. Ces facteurs influent sur la trajectoire géométrique de manœuvre et méritent d'être intégrés dans un modèle plus élaboré.

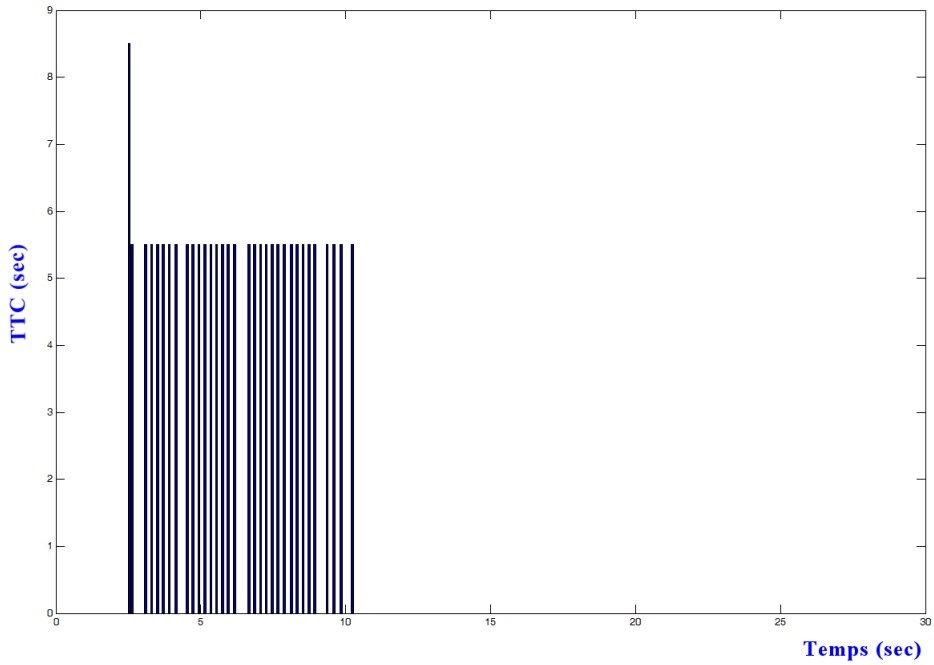

FIG. 5.13 – Le temps à collision pendant le test

Un autre facteur important est la durée du changement de voie. Dans cette étude, nous nous sommes basés sur des études statistiques pour fixer une valeur unique pour toutes les manœuvres. Cependant, il est judicieux de proposer un modèle qui détermine dynamiquement ce paramètre à partir de la vitesse du véhicule et du profil de conduite.

Les scénarios de changement de voie étudiés durant nos expérimentations nous ont permis de constater une certaine limite imposée par l'erreur sur le positionnement du GPS. Actuellement, la valeur de cette erreur peut être parfois supérieure à la largeur de la voie de route. En cas d'une mauvaise qualité de signal GPS, ces erreurs posent des questions légitimes sur l'efficacité de notre système d'aide au changement de voie. Mais nous nous appuyons sur le progrès incessant et rapide des technologies de positionnement qui tendent à fournir avec le temps des positions plus fiables et plus précises. En attendant un tel système, nous pouvons continuer à proposer les services de notre système lorsque l'erreur de position dans le temps et dans l'espace ne dépasse pas un seuil jugé nécessaire au bon fonctionnement de notre application.

Bibliographie

[1] Barr, L. and Najm W.G., "Crash problem characteristics for the intelligent vehicle initiative" TRB 80th Annual Meeting, Washington, DC., 2001, January, Paper No. 01-2471

[2] Chovan, J.D., Tijerina, L, Alexander, G., and D.L. Hendricks,"'Examination of Lane Change Crashes and Potential IVHS Countermeasures", DOT HS 808 071, March 1994.

[3] Eberhard, C. D., Luebkemann, K. M., Moffa, P. J., Young, S. K., Allen, R. W., Harwin, E. A.,Keating, J., Mason, R. "Development of performance specifications for collision avoidance systems for lane change, merging and backing". Task 1 interim report : Crash problem analysis (DOT HS 808 431). Washington, DC : National Highway Traffic Safety Administration.(1994)

[4] Hetrick, S. (1997). "Examination of driver lane change behavior and the potential effectiveness of warning onset rules for lane change or side crash avoidance systems" Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

[5] Knipling, R. R. "IVHS technologies applied to collision avoidance : Perspectives on six target crash types and countermeasures". In Proceedings of the 1993 Annual Meeting of IVHS America : Surface Transportation : Mobility, Technology, and Society (249-259). Washington, DC.

[6] Suzanne E. Lee, Erik C.B. Olsen, and Walter W. Wierwille (2004) "A Comprehensive Examination of naturalistic Lane-Changes", Virginia Tech Transportation Institute / National Highway Transportation Safety Administration, Blacksburg, VA, 2004.

[7] Papadimitriou, I. Tomizuka, M. "Fast lane changing computations using polynomials", American Control Conference, 4-6 June 2003.

[8] Dario D. Salvucci, Andrew Liu, Erwin R. Boer, "control and monitoring during lane changes"

[9] Shamir, T. "How should an autonomous vehicle overtake a slower moving vehicle : design and analysis of an optimal trajectory", IEEE Transactions on Automatic Control, April 2004.

[10] SWOV, Ongelukkendatabase [Accident database]. Leidschendm. 2004. Available online at : www.swov.nl.

[11] Tijerina, L., Garrott, R, W., Glecker, M., Stoltzfus, D., Parmer, E. "Van and passenger car driver eye glance behavior during lane change decision phase". Transportation Research Center, Inc. and National Highway Transportation Safety Administration, 1997.

[12] Wonshik Chee Tomizuka, M. Patwardhan, S. Wei-Bin Zhang, "Experimental study of lane change manoeuvre for AHS applications", Proceedings of the American Control Conference, 1995.

[13] Van Winsum, W., n Waard, D., Brookhuis, K. A. (1999). Lane change maneuvers and safety margins. Transportation Research Part F 2, 139-149. Elsevier.

[14] Takashi Wakasugi, "A study on warning timing for lane change decision aid systems based on driver's lane change maneuver" Japan Automobile Research Institute

[15] Wang, J.-S., Knipling, R. R. . "Lane change/merge crashes : Problem size assessmentand statistical description" (Final Report, DOT HS 808075). Washington, DC : National Highway Transportation Safety Administration.(1994)

[16] Wierwille, W. W. (1984)."Driver steering performance" (Chapter 16). In G. A. Peters B. J. Peters (Eds.), Automotive Engineering and Litigation, 1, 407-434. New York : Garland Law.

[17] Worrall, R. D. Bullen, A. G. R. , "An empirical analysis of lane changing on multilane highways". Highway Research Board, 303, 30-43.(1970)

[18] Young, S. K., Eberhard, C. A., Moffa, P. J. (1995, February). "Development of performance specifications for collision avoidance systems for lane change, merging, and backing". Task. 2 : Functional goals establishment. TRW Space and Electronics Group Washington, DC. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.

[19] Yan Zhang, "Scalability of car-following and lane-changing models in microscopic traffic simulation systems", Master's Thesis,faculty of the louisiana state university and agricultural and mechanical college, August 2004

[20] Godthelp, J., A.R.A. van der Horst, S. Burrij, and C. van de Lagemaat, "Open and Closed Loop Steering in a Lane Change Maneuver." Institute for Perception : National Defense Research Organization TNO group, November 1983

Chapitre 6

Conclusion

Lorsque le sujet de la thèse a été défini il y a quelques années, les travaux en communication pour les applications automobiles étaient encore à leur début. Petit à petit, les idées et concepts imaginés il y a quelques années commencèrent à prendre forme. Le temps a donné raison à notre vision et nos expectations et aujourd'hui nous connaissons un boom de projets nationaux et européens très orientés vers la communication au service des applications automobiles. En effet, les communications Véhicule-à-Infrastructure (V2I) et Véhicule-à-Véhicule (V2V) sont devenues omniprésentes dans ces projets et notamment pour le développement de systèmes de transports intelligents.

Cette thèse a traité de la conception de nouveaux systèmes d'aide à la conduite basés sur l'exploitation des moyens de communication inter-véhiculaire.

Aujourd'hui, deux visions du développement et du déploiement de la communication véhiculaire s'affrontent ; elles sont basées toutes les deux sur des "business models" différents. La première perçoit la communication comme un outil technologique supplémentaire mis au service d'un package multimedia, donc une simple extension des services d'information et de divertissement de l'"off-board". La deuxième considère cet outil comme un nouveau capteur capable de relayer des informations issues de sources tierces et qui contribueraient à la conception de nouveaux systèmes révolutionnant la conduite automobile en introduisant la notion de conduite coopérative. Cette vision considère donc les véhicules comme des agents coopérants au sein d'un réseau routier où les informations véhiculeraient entre agents et avec l'infrastructure.
Par conséquent, les recherches et développements se sont dirigés vers l'élaboration de deux grands groupes d'applications utilisant cette technologie : les applications d'"infotaitement" et les applications de sécurité routière. Naturellement, les applications d'"infotaitement" ont des points d'avance sur les applications sécuritaires puisque pour ce genre de services 1) les exigences technologiques sont moins dures, 2) le retour sur investissement est plus rapide et 3) la nature des applications les rend plus attractives pour le client final.

Nous pensons que ces deux approches devraient cohabiter sur le plan de développement des nouveaux systèmes de conduite impliquant les véhicules de demain.

Si les applications de type "infotaitement" semblent plus intuitives et plus faciles à expliquer, il est en revanche plus difficile de convaincre les clients de l'opportunité d'exploiter une technologie relativement jeune dans des systèmes touchant à la sécurité.

Notre thèse se place dans la mouvance des applications sécuritaires. Les travaux décrits dans ce mémoire visent à démontrer la contribution effective et efficace de la communication inter-véhiculaire dans la conception de nouveaux systèmes d'aide à la conduite. Ces systèmes s'appuient sur la communication comme media de coopération entre les véhicules. Parmi les applications sécuritaires visées, nous en avons choisi deux qui visent la réduction du risque de collision entre véhicules en mouvement. De plus, ces applications

reflètent des situations concrètes dans lesquelles la coopération amène une réelle valeur ajoutée et contribue à l'amélioration de la sécurité et du confort.

Dans un domaine où la standardisation guide toujours le choix des solutions, notre défi a été double : concevoir une plateforme opérationnelle de véhicules communicants, et participer à l'effort de standardisation en testant les technologies existantes et en analysant les besoins.

Nos premiers travaux ont consisté à doter nos prototypes de véhicules intelligents de moyens de communication. Ce travail comprend le choix des technologies de communication, les modalités de leur intégration sur véhicule et les tests de leurs performances.

Ce travail nous a permis de constater que la technologie Wifi, conçu a priori pour le domaine statique, a montré une robustesse au niveau de la qualité du signal dans un milieu fortement dynamique.
Les deux couches physique et liaison définies par cette technologie présentent des performances jugées acceptables et peuvent ainsi servir comme une base au-dessus de laquelle nous pouvons bâtir des applications de sécurité.
Le travail de la standardisation de la norme *802.11 p* qui doit être disponible fin 2008, approuve pour l'instant ces constatations.

Durant les expérimentations que nous avons effectuées, nous avons pu constater une grande influence de l'environnement sur les performances de la communication. Malgré cela, les performances globales restent acceptables puisque la sensibilité par rapport aux perturbations peut aussi se traduire par des dégradations ponctuelles qui n'occultent qu'instantanément les informations communiquées.

L'étude sur les performances a porté sur l'influence de la distance entre les deux véhicules communicants et de la vitesse relative sur le débit de communication et la latence d'acheminement des données.
Malgré les résultats encourageant de cette étude, la caractérisation du canal de communication dans cette bande de fréquence restera une tâche très importante pour comprendre le comportement du canal et pas la suite proposer des solutions plus robustes et plus fiables.

Cette étape de détermination des performances est primordiale pour pouvoir proposer de nouveaux services réalistes d'assistance à la conduite.

Après cette étape d'analyse du système, nous avons choisi de le tester en l'intégrant à notre plateforme mobile dans le cadre de la conception de nouveaux systèmes coopératifs d'aide à la conduite. Ainsi, nous avons choisi d'étudier en profondeur deux scénarios dans lesquelles nous pensons que la coopération intervéhiculaire peut être utile.

Le premier scénario est celui de la prévention des collisions à l'approche des intersections. A partir de l'analyse des causes d'accidents sur intersections, nous avons constaté que la communication pouvait fournir des informations susceptibles d'aider le conducteur à mieux gérer le risque de collision. Notre approche consiste à utiliser la communication pour construire dans chaque véhicule une carte dynamique dans laquelle figure la position et les paramètres des véhicules environnants. Sur la base de cette carte, nous estimons la possibilité de collision entre les différents véhicules. Ce calcul est fait en prédisant un horizon de déplacement des véhicules et en calculant les risques de collisions entre leurs trajectoires respectives.
Lors de ces prédictions, nous essayons de prendre en compte les erreurs des différents processus et éléments : erreurs sur les positions GPS des véhicules, délais de communications (latences), et erreurs sur le modèle de prédiction. Ainsi, les trajectoires prédites sont filtrées par un filtre de Kalman qui intègre un modèle de déplacement, estime les erreurs de positionnement et permet la prise en compte des délais dans notre système de communication.

La finalité de cette étude est de proposer un indicateur de risque au conducteur qui aborde une intersection. Nous avons choisi ainsi de proposer un indice de risque qui prend compte de la configuration de l'intersection et de la répartition des différents agents (véhicules). Cet indicateur évalue à la fois le TCC (temps à l'impact), le temps de l'accrochage et de la dangerosité du choc pour proposer un indice qui ne se contente pas de prévoir le risque mais qui l'associe au degré de fiabilité de notre système.

Les tests effectués sur véhicules permettent de constater que la communication peut assurer fonctionnellement le rôle de prévention en assurant une connaissance anticipée du contexte routier et ce, contrairement et avantageusement par rapport aux systèmes d'assistance classiques basés sur les capteurs de perception traditionnels. A noter tout de même que la portée de ce capteur de communication est très dépendante de la configuration géométrique du carrefour. Il s'avère parfois nécessaire d'ajouter sur certains "carrefours difficiles" des points de relais pour assurer l'échange de données avec une profondeur jugée acceptable pour la prévention de risque.

Au niveau de la gestion de risque, nous avons effectué une analyse basée sur un ensemble de paramètres qui reflètent la dangerosité et la persistance du risque.

Le deuxième scénario étudié consiste à proposer de l'aide à la décision lors d'un changement de voie. En effet, lorsque le conducteur montre l'intention de changer de voie (clignotant par exemple), le système lui fournit un indicateur de risque de collision avec les véhicules avoisinants. Ici aussi, notre système exploite la carte dynamique échangée entre les véhicules. Nous avons porté une attention particulière sur la proposition d'un

modèle de déplacement lors d'un changement de voie pour pouvoir prédire les trajectoires respectives des différents véhicules.

Nous avons ainsi proposé un modèle polynomiale de déplacement du 5me degré. Dans le but de rendre ce modèle plus réaliste, nous l'avons contraint par des conditions aux limites d'ordre dynamique.
Le modèle proposé a été ensuite testé dans une série d'acquisitions qui ont permis de monter sa validité malgré la grande diversité dans l'exécution des manœuvres de changement de voie.
Une fois la trajectoire du véhicule modélisée, l'aide au changement de voie consiste à détecter toutes les collisions possibles entre notre véhicule et les véhicules voisins. A chaque collision est donc associé un indicateur de risque correspondant au niveau de dangerosité de la manœuvre.

Les tests effectuées sur les véhicules *lara* permet de monter la validité de notre approche sur des données réelles. Toutefois, l'incertitude au niveau de la position du véhicule permet de générer des trajectoires de qualité médiocre et par la suite de réduire la confiance dans le système de détection de collision.

Parallèlement aux deux scénarios décrits ci-dessus, nous avons également exploré la possibilité d'utiliser la communication inter-véhiculaire comme capteur de référence notamment pour des applications nécessitant des vérités terrain (ou *ground truth*) comme les algorithmes de détection d'obstacles par exemple. En effet, lors des validations d'algorithmes de ce genre, basés sur l'analyse de données issues de capteurs extéroceptifs, il est souvent très difficile de qualifier quantitativement les performances de ces algorithmes à cause de l'absence d'une vérité terrain fiable. La communication V2V permet de combler fortement cette lacune puisque tous les véhicules et notamment les véhicules-obstacles peuvent, grâce à la communication V2V, envoyer leurs paramètres (position, vitesse, ...). Ces informations nous permettent alors d'évaluer à tout instant les taux de détection, taux de non-détection et taux de fasses alarmes.
Bien qu'intéressante et prometteuse, par manque de temps, nous n'avons pas pu aller loin dans l'étude quantitative de cette approche très intéressante. En revanche, celle-ci a été validée dans le cadre de travaux menés en partenariat avec le groupe Valeo sur la gestion intelligente des interdistances entre les véhicules. Les exigences de confidentialité nous interdisent de détailler ce projet.

Dans un autre effort de recherche prospectif présenté dans l'annexe B, nous nous sommes proposés d'étudier la fusion entre des informations issues de la perception et des informations communiquées par les véhicules voisins communicants et observables. Par exemple, l'envoi d'un véhicule par communication V2V de sa position et de sa vitesse permet de localiser grossièrement le véhicule dans le repère caméra de notre véhicule et

permet ainsi de focaliser la recherche dans l'image autour de la position estimée. Si tous les véhicules étaient équipés, cela permettra de focaliser les recherches dans des zones précises de l'image, ce qui représente un gain certain en coût calculatoire. De même, la fusion des informations issues de la caméra et celles provenant du canal de communication permet d'affiner l'estimation des paramètres grâce à des outils de filtrage et de fusion adéquats.
Plus généralement, l'identification et l'association d'une cible visuelle avec une cible se déclarant par communication à distance permet de créer un canal virtuel entre deux entités qui communiquent et qui s'observent ! Cette forme de communication "personnalisée" peut avoir des applications directes très intéressantes. Par exemple, nous pourrions concevoir un "klaxon virtuel" qui, au lieu de se manifester dans l'environnement de manière bruyante et isotrope, celui-ci pourra être adressé à une cible particulière que nous voudrions alerter. Dans ce cas, le klaxon pourrait se manifester d'une manière plus discrète voir plus riche puisqu'on peut envoyer par la communication V2V un message plus élaboré !

Annexe A

Caractéristiques du point d'accès DWL 2100+

Le DWL-2100AP choisi peut fonctionner avec l'un des cinq modes suivants : (1) en tant que point d'accès sans fil, (2) en tant que pont point-à-point vers un autre point d'accès, (3) en tant que pont sans fil point-à-multi-point, (4) en tant que client sans fil ou (5) en tant que répéteur sans fil.

Ces points d'accès ont la possibilité de fournir deux versions du Wifi : IEEE 802.11g, 802.11b

Client et serveur DHCP

Taux de transfert des données sans fil(avec repli automatique de vitesse)
54, 48, 36, 24, 18, 12, 11, 9, 6, 5.5, 2 et 1Mbps.

Encryptage des données WEP 64/128/152 bits

Media Access Control CSMA/CA avec ACK

Bandes de fréquences sans fil
802.11b : bande ISM 2400 à 2483.5 MHz
802.11g : bande ISM 2400 à 2483.5 MHz

Modulations RF
802.11b : DQPSK, DBPSK et CCK
802.11g : BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, OFDM

Sensibilité de réception (802.11g)
-66 dBm @ 54Mbps
-71 dBm @ 48Mbps
-76 dBm @ 36Mbps
-80 dBm @ 24Mbps
-83 dBm @ 18Mbps
-85 dBm @ 12Mbps
-86 dBm @ 9Mbps
-87 dBm @ 6Mbps

Puissance de transmission (802.11b)
18 dBm @ 11Mbps, 5.5Mbps, 2Mbps, 1Mbps

Puissance de transmission (802.11g)
14 à 15 dBm @ 54 et 108Mbps

14 à 16 dBm @ 48Mbps
16 à 18 dBm @ 36, 24, 18, 12, 9 et 6 Mbps

Alimentation électrique
DC 5V, 2.0A

Consommation électrique
5 Watts

Annexe B

Calibration GPS/Caméra

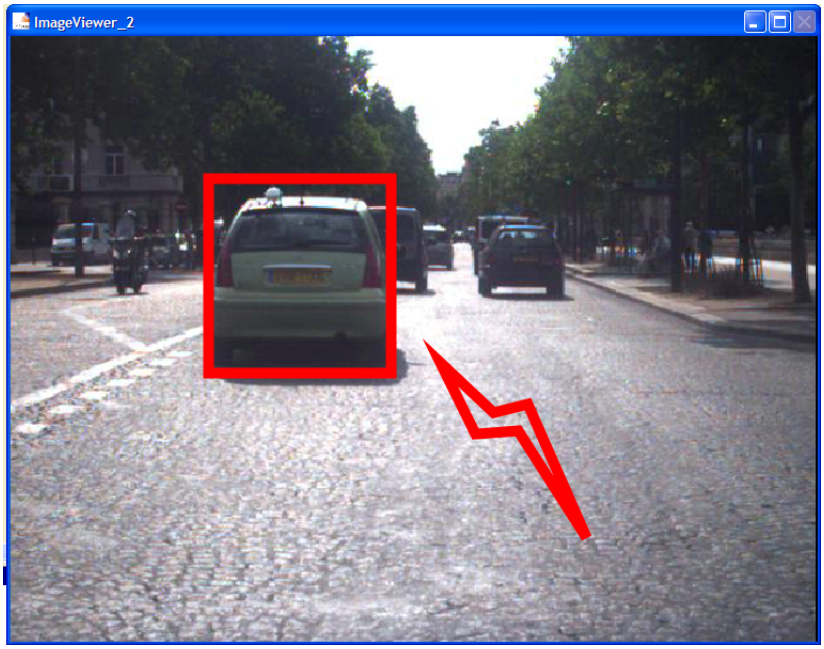

FIG. B.1 – Le klaxon virtuel

Une caméra fournie une série d'images de la scène réelle filmée. La calibration de la caméra permet de retrouver des objets 3D (voitures, mires...) dans le flux d'image.

Quant au GPS, il fournit, avec une précision plus ou moins bonne, la position (3D ou 2D) de l'objet dans un référentiel monde spécial.

Nous entendons par calibration Caméra/GPS, l'identification la mise en correspondance entre les objets dans ces deux représentations différentes. Ceci revient à retrouver des objets dans le flux vidéo qui correspondent à la position 3D de ceux ci fournies par GPS.

La réalisation de cette mise en correspondance entre ces deux types de données ouvre les possibilités vers de nouveaux types d'application. Ainsi, l'identification de la voiture dans le flux vidéo à partir de sa position GPS émise peut être utile pour :

1. Améliorer la précision des algorithmes de détection et d'estimation des paramètres des véhicules par vision. En effet, La position fournie par GPS permet de localiser des zones d'intérêt dans le flux vidéo pour la détection de ces objets. Les algorithmes de vision se focalisent donc sur ces régions pour extraire le contour précis des objets.
2. Servir comme des données de référence pour l'évaluation des différents algorithmes

de détection des véhicules par vision. Ce genre de système est utile pour pouvoir comparer les différents systèmes de prévention de risque par vision. Cette évaluation se fait actuellement d'une manière non précise qui consiste à re-créer les conditions de l'expérimentation et d'évaluer les performances des algorithmes sans connaissance précise de la réalité sur terrain.

3. Échanger discrètement des messages entre deux voitures. Le klaxon discret est un klaxon envoyé par communication à un véhicule précis (identifié par sa position). Le véhicule récepteur pourra éventuellement identifier l'émetteur grâce à sa position GPS envoyé dans le message. Ce type de klaxon se déclenche seulement à l'intérieur du (ou des) véhicule(s) visé(s), dispensant ainsi les autres conducteurs et piétons du dérangement habituel.

4. Améliorer le positionnement 3D du véhicule par fusion des données GPS avec le positionnement issu du traitement de l'image.

Néanmoins, pour pouvoir faire cette mise en correspondance entre ces deux capteurs, la caméra et le GPS doivent être quasi parfaitement synchronisés et exprimés dans le même repère.

Nous avons choisi donc de travailler dans le repère caméra. Le repère caméra est un repère direct lié à la voiture et centré sur l'essieu avant du véhicule comme constaté sur la figure B.2. Ce repère est un repère mobile avec la voiture de manière à ce que l'axe x pointe toujours dans le sens de déplacement de celle-ci. Ce repère véhicule fait ainsi un angle $\alpha(t)$ avec le repère absolu (repère du GPS) suivant l'angle de l'orientation du véhicule dans ce repère absolu. Cet angle $\alpha(t)$ est une fonction du temps puisque l'orientation du véhicule change durant son déplacement. Ainsi, pour déterminer la position de la voiture dans la vidéo, il faut chercher la position de celle-ci dans le repère Caméra.
Notons que les transformations entre le repère vidéo et le repère caméra sont faites à la base d'une calibration par une mire 3D. Ces travaux du centre de Robotique sont publiés dans la thèse de M.Ayoub Khammari [1].

Soit (X,Y) le repère absolu fixe et soit (X2,Y2) le repère lié à la voiture. Comme on peut le constater sur la figure 1, la transformation entre ces deux repères est une association d'une translation ([X,Y] => [X1,Y1]) et d'une rotation ([X1,Y1] => [X2,Y2]) comme décrit dans les équations suivantes :

$$X_2 = X_1 cos(\alpha) + Y_1 sin(\alpha); \tag{B.1}$$

$$Y_2 = -X_1 sin(\alpha) + Y_1 cos(\alpha); \tag{B.2}$$

$$X_1 = X - a; \tag{B.3}$$

$$Y_1 = Y - b; \tag{B.4}$$

$$X_2 = X_1 cos(\alpha) + Y_1 sin(\alpha) - acos(\alpha) - bsin(\alpha); \tag{B.5}$$

$$Y_2 = Y_1 cos(\alpha) - X_1 sin(\alpha) + asin(\alpha) - bcos(\alpha); \tag{B.6}$$

où le vecteur $[a, b]$ est la position de la voiture dans le repère GPS.

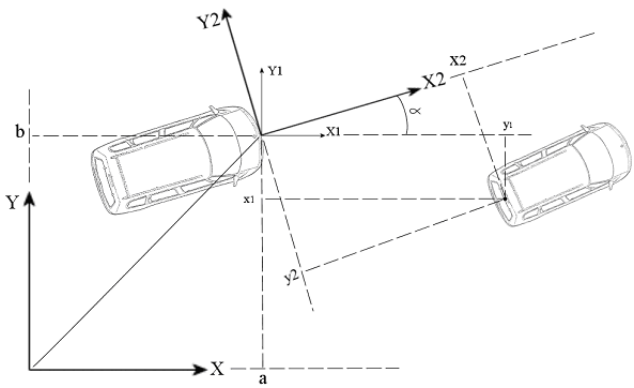

FIG. B.2 – Transformation du repère absolu au repère lié à la voiture

Tout le problème revient donc à déterminer l'angle α qui évolue continuellement avec le déplacement de la voiture. Deux capteurs peuvent fournir une estimation de cet angle :

- La centrale inertielle fournit un angle relatif précis avec une dérive avec le temps.

- Le récepteur GPS fournit la position absolue et par différentiation un vecteur vitesse. Ce vecteur vitesse doit, a priori, avoir la même orientation que l'axe x du repère véhicule (à un signe près). Le problème majeur avec ce genre de calcul est que la différentiation n'est valide que si l'erreur (surtout latérale) sur le positionnement GPS est limitée et que la voiture n'est pas à l'arrêt ni sur un virage.

D'où l'idée de coupler les résultats de ces deux capteurs dans le but d'estimer un angle $\alpha(t)$ plus robuste.

Inertial Navigation system INS

Etude à l'arrêt :

La figure B.3 montre un extrait de l'angle fournit par la centrale inertielle à l'arrêt. Le but de cette acquisition est d'estimer la dérive de cet angle avec le temps.

La figure B.3 montre que la dérive pour 280 sec était de 64 degrés c'est-à-dire avec une pente de 0.2286°/sec (0.00399 radian/sec).

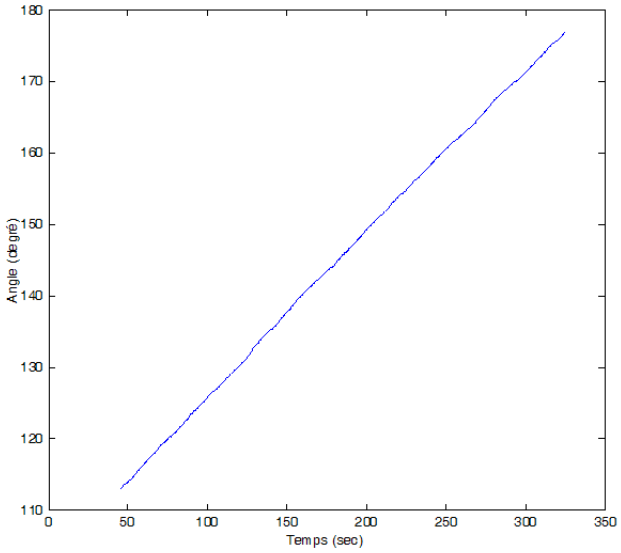

FIG. B.3 – L'angle de l'orientation de la centrale pris à l'arrêt

Les données GPS :

Le calcul de l'angle de l'orientation de la voiture se fait en calculant l'angle de la tangente à la trajectoire de la voiture (pente de la dérivée). Ce calcul présente l'inconvénient d'être sensible à l'erreur du positionnement fourni par les récepteurs GPS. De ce fait, l'angle calculé ne sera validé que si :

- La vitesse du véhicule est plus grande qu'un seuil donné à déterminer (nous prenons un seuil de 5 km/h).
- L'écart type de l'angle calculé par rapport à un historique doit être inférieur à un seuil donné (nous prenons un écart type de 5 degrés). Ce qui élimine les trajectoires bruitées en même temps que les trajectoires courbées.

Fusion :

Nous prenons comme angle de référence l'angle absolu délivré par le GPS après validation et stabilisation comme décrit ci-dessus. Cet angle sera donc incrémenté à chaque acquisition par l'écart relatif fourni par la centrale. Cet écart sera calculé en prenant en compte la dérive déjà estimée. La figure B.4 illustre ces différentes étapes sur une acquisition faite dans le boulevard Saint Michel sur une ligne droite.

Nous pouvons ainsi constater la stabilité de l'angle finale et son adéquation avec l'angle GPS aux instants où ce dernier ne présente pas des pics bruités.

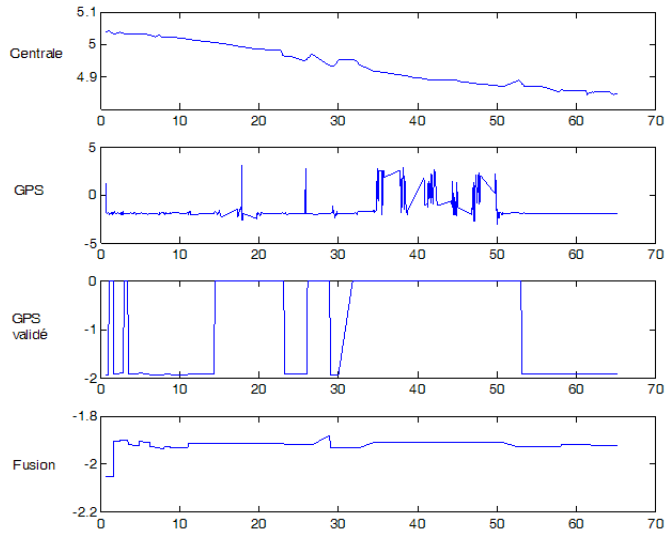

FIG. B.4 – Comparaison entre l'évolution de l'angle alpha entre INS, GPS, angle de GPS validé et la fusion entre GPS validé et INS

Durant cette manipulation, nous constatons que :
Temps de l'acquisition 64.5756 sec
Dérive totale de la centrale -0.1905 radian
Pente = - 0.0025 radian /sec.

La détermination de la pente de dérive peut être aussi faite par estimation de la pente de la droite par la méthode des moindres carrés qui modélise les données de la centrale B.6.

Ainsi la pente estimée par une droite des moindres carrés est de l'ordre de -0.1907° par seconde. (-0.0033 radian/sec)

D'ailleurs, La dérive de l'angle fusion est 0.1309 radian ce qui correspond à une pente de 0.0026 radians/sec. De même que précédemment, une droite de moindre carré sur ces données estime la pente à 0.0004 radians/sec.

Nous obtenons ainsi une réduction de la dérive de la centrale d'un facteur de 10. L'amélioration de ce résultat peut être aussi faite par des conditions plus strictes qui diminuent la transposition de la dérive de la centrale sur l'angle stable finale.

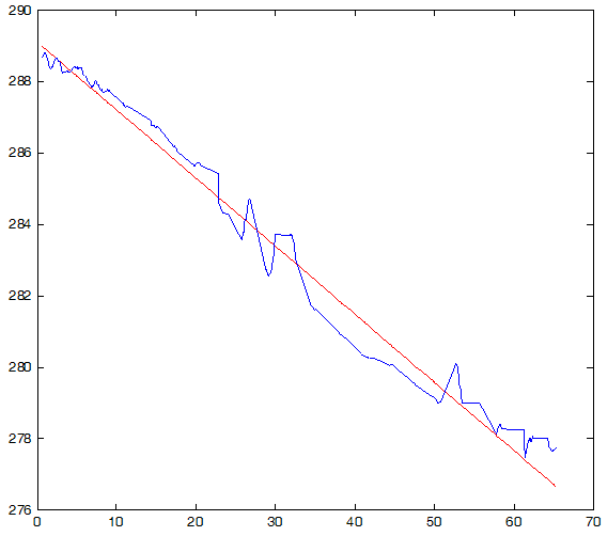

FIG. B.5 – En bleu la dérive de l'angle de la centrale et en rouge la droite des moindre carrée

Vérification de la fusion de INS/GPS pour la détermination de α sur une grande acquisition avec courbure :

L'acquisition est faite entre la place Denfert et la place d'Italie à Paris. La route empruntée comporte des courbures avec un rond point. La figure B.6 illustre la superposition des différents angles calculés. Nous illustrons en cyan l'angle final stabilisé. Nous remarquons que cette angle reste fidèle à l'enveloppe de l'angle calculé par le GPS tout en suivant l'évolution de l'angle calculé par la centrale.

Cette estimation assez robuste de l'angle α est utilisé pour déterminer la transformation entre les deux repères des voitures. Pour effectuer la projection de la voiture dans la scène filmée, nous utilisons un modèle géométrique des dimensions du véhicule. Nous cherchons l'emplacement dans le flux vidéo de la position 3D du véhicule qui émet sa position. La figure B.7 nous donne un exemple de ce cette projection.

Malgré les résultats assez encourageants de cette méthode, nous avons pu repérer plusieurs pistes d'amélioration de cette mise en correspondance :

- L'intégration de l'erreur du positionnement par GPS dans cette mise en correspondance. Ceci nécessite une transposition du modèle d'erreurs du GPS vers un modèle d'incertitude dans le flux vidéo.
- L'estimation du l'angle du tangage et de roulis du véhicule porteur de la caméra. En vue sa définition, la position GPS ne tient pas compte de l'orientation du véhicule. D'où la nécessité d'intégrer ces deux angles dans le modèle de projection de la caméra

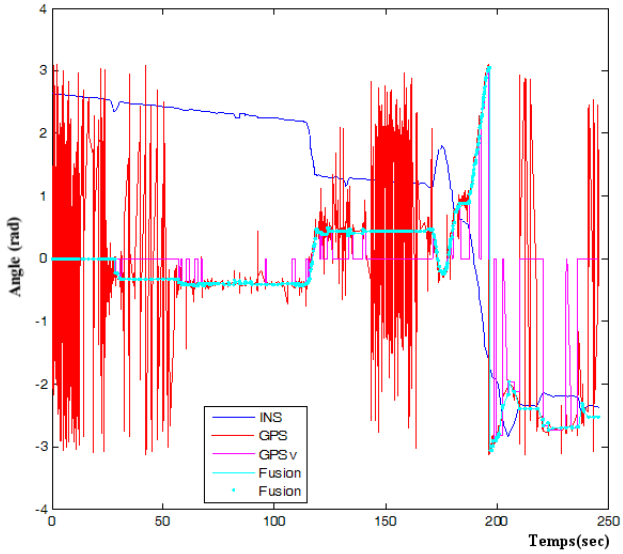

FIG. B.6 – Evolution des différents angles

pour pouvoir appliquer cette méthode d'une manière plus générale.

- L'amélioration du positionnement du véhicule en contraignant la trajectoire de celui ci par un modèle dynamique et réaliste du véhicule. Ce modèle peut être ensuite utilisé pour améliorer le positionnement par un filtrage de Kalman par exemple.
- La modélisation géométrique du véhicule pour une meilleure localisation selon l'orientation de celui ci. En effet, la communication de la position GPS permet de guider les algorithmes de vision en lui informant de la direction de la voiture à détecter.

Enfin, nous rappelons qu'une mise en correspondance assez robuste entre ces deux capteurs permet une nouvelle génération de services personnalisés pendant la conduite. Comme toute nouvelle technologie, une mauvaise utilisation peut nuire à l'utilité du concept en soi. Mais cette personnalisation des messages, pour l'instant non existantes dans le domaine véhiculaire, peut être très utile pour des applications de fluidité de trafic, de limitation de bruit, de demande d'informations pratiques, etc.

au niveau scientifique, cette technique peut amener à une utilisation des données de communications pour fournir les réalités sur le terrain afin de pouvoir comparer efficacement les algorithmes de détection par vision des robots mobiles en général ou des véhicules en particulier.

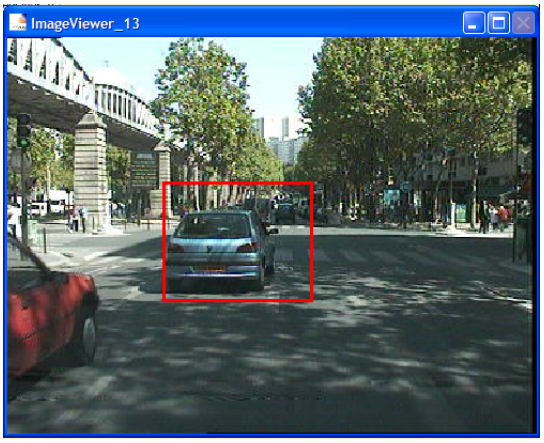

FIG. B.7 – La projection de la position 3D de *Lara2* dans le flux vidéo de *Lara1*

Bibliographie

[1] Système embarqué de détection multi-sensorielle de véhicules application à la gestion intelligente des interdistances, Ayoub Khammari - 2006 - ENSMP - 1 vol. (200 p).