

THESE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'EVRY – VAL D'ESSONNE

Spécialité : Automatique, Systèmes productiques et Robotique

Présentée par

Jamil Dakhlallah

Risque Intégré de Sortie de Route et Proposition d'une Assistance à la Conduite

Directeur de thèse : M. Saïd Mammar

Soutenue le 13-01-2010

Devant la commission d'examen

COMPOSITION DU JURY

M. N. M'Sirdi	Professeur, LSIS, Marseille	Rapporteur
M. P. Bonnifait	Professeur, UTC, Compiègne	Rapporteur
M. F. Goulette	Chercheur, Mines-paristech, Paris	Examineur
M. P. Lepert	Directeur de Recherche, LCPC, Nantes	Examineur
M. M. Benjelloun	Directeur de Recherche, LASL, Calais	Examineur
M. S. Glaser	Chercheur, LIVIC/LCPC, Versailles	Encadrant
M. S. Mammar	Professeur, IBISC, Evry	Directeur de thèse

Remerciement

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire sur les Interactions Véhicule - Infrastructure - Conducteur (Unité mixte INRETS/LCPC). Mes remerciements s'adressent, donc, à toute l'équipe du LIVIC qui m'a accueilli pendant 3 ans pour venir à bout de cette thèse.

Je remercie particulièrement Monsieur Saïd Mammar, Professeur à l'université d'Evry, chercheur au CEMIF-LSC et chercheur associé à l'INRETS, pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse, ainsi que Monsieur Sébastien Glaser, chercheur au LIVIC pour avoir encadré ma thèse. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude pour leur soutien et les connaissances qu'ils ont pu me transmettre.

C'est aussi un grand plaisir pour moi de remercier les membres du jury, Messieurs Nacer M'Sirdi, Professeur au LSIS Marseille, Philippe Bonnifait, Professeur à l'UTC Compiègne, François Goulette, chercheur à l'école des mines Paris, Minh Tan Do, chercheur au LCPC Nantes, et Mouhamad Benjelloun, directeur de recherche LASL Calais.

Je remercie spécialement mes parents qui ont beaucoup sacrifié pour me permettre d'être là où je suis.

Un grand merci à Rita, pour toute l'affection et le soutien moral qu'elle m'a prodigués pendant les années de préparation de ce travail.

Enfin,

A mes sœurs qui m'ont soutenue et encouragée à continuer,

A tous mes amis en France, qui sont devenus ma deuxième famille, qui étaient toujours là pour m'encourager, me pousser, et surtout me supporter quand j'étais insupportable,

Je vous remercie pour tout et je vous dédie ce travail.

A mes Parents,
A Rita,
A Ahmad,

Résumé

La sortie de route est l'une des causes principales des accidents. En dehors de l'inattention du conducteur, elle est principalement due à une vitesse inadaptée, que ce soit par rapport aux limites légales de vitesses ou à l'environnement. Or les systèmes visant à alerter le conducteur de dépassements de la limite ou à le contraindre à une certaine vitesse existent et ont un impact positif sur les accidents. Cependant, ils n'ont pas encore atteints la maturité de systèmes d'assistance agissant en fonction de toutes les conditions de conduite.

Cette thèse a pour objet d'étudier le risque intégré de sortie de route et donc de développer un système d'alerte à des vitesses excessives qui permet de déterminer la vitesse limite en fonction de toutes les conditions extérieures (environnement, infrastructure), du comportement du conducteur et de la dynamique du véhicule.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons de définir les différents facteurs de l'infrastructure, de l'environnement, du véhicule et du conducteur, limitant la vitesse. Certains de ces facteurs sont mesurables, les autres seront estimés par des observateurs. Ainsi, nous établirons des relations entre ces facteurs et la vitesse du véhicule en se basant sur des modèles mathématiques. Ces modèles nous permettront de définir des facteurs d'ajustement d'une vitesse de référence. La vitesse ajustée pourra ensuite être utilisée soit pour alerter le conducteur dans un système d'assistance, soit pour évaluer les limites existantes.

Un modèle de véhicule étant nécessaire à la synthèse des observateurs et à la qualification de la dynamique véhicule, nous avons opté pour le modèle à quatre roues. Le filtre de Kalman étendu a été utilisé comme technique d'estimation. Pour le développement théorique du système d'alerte, nous utilisons le profil de la SAVV comme vitesse de référence après quelques améliorations. Ensuite, plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour lier la vitesse aux autres facteurs influents.

Le système développé a été implanté sous SimuLink/MatLab et nous avons pu présenter quelques scénarios pratiques. Enfin, des expérimentations en temps réel sur un véhicule prototype du LIVIC ont permis de valider les résultats des simulations.

Table des matières

Partie I : Introduction et recherche bibliographique	1
Chapitre 1 : Introduction.....	3
Chapitre 2 : État de l’art.....	7
1. Introduction	7
2. Accidentologie	7
3. Vitesse et sortie de route	8
3.1. L’enjeu de la vitesse	8
3.2. La sortie de route : conséquence d’une vitesse excessive	10
4. Limitation de la vitesse.....	12
4.1. Méthodes de calcul de la vitesse limite	12
4.1.1. Systèmes nationaux de limitations de la vitesse	13
4.1.2. Modèle mathématique	14
4.1.3. Modèle réel.....	15
4.1.4. Simulation et comparaison	16
4.2. Systèmes de lutte contre les vitesses excessives	18
4.2.1. Les indicateurs.....	19
4.2.2. Les systèmes d’alerte.....	20
4.2.3. Les systèmes actifs	21
4.2.4. Nouvelle technologie d’assistance à la vitesse et de contrôle du véhicule.....	21
5. Conclusion.....	23
Chapitre 3 : Architecture du système d’alerte et méthodes de calcul	25
1. Introduction	25
2. Architecture générale du système développé	26
3. Fonctionnement des différentes parties du système	28
3.1. Mesures	28
3.1.1. Paramètres du véhicule.....	28
3.1.2. Paramètres de l’infrastructure.....	29
3.1.3. Paramètres de l’environnement	29
3.1.4. Mesures nécessaires.....	29
3.2. Développement théorique.....	30
3.2.1. Vitesse de référence.....	30
3.2.2. Traitement des données	30

3.2.3. Conception des LUT.....	31
3.3. Profil de vitesse maximale.....	32
3.4. Génération d'alerte	32
4. Evaluation du système.....	32
5. Méthodes de calcul	33
5.1. Capteurs utilisés dans notre étude	33
5.1.1. Capteurs de la dynamique du véhicule	34
5.1.2. Capteurs des conditions de l'infrastructure et l'environnement	39
5.2. Filtres et observateurs.....	40
5.2.1. État de l'art sur les différents types d'estimateurs.....	41
5.2.2. Filtre de Kalman	42
5.2.3. Filtre de Kalman pour les systèmes linéaires	43
5.2.4. Filtre de Kalman Etendu.....	43
5.2.5. Filtre de Kalman Unscented	44
5.2.6. Avantages et inconvénients :	45
6. Conclusion.....	45
Partie II :Modélisation et estimation.....	47
Chapitre 4 : Modélisation du véhicule, de l'infrastructure et du conducteur	49
1. Introduction	49
2. Système Véhicule-Infrastructure-Conducteur.....	49
2.1. Le véhicule	50
2.2. L'infrastructure.....	50
2.3. Le conducteur	50
3. Modélisation du véhicule	50
3.1. Perturbations aérodynamique	51
3.2. Modèle de contact pneumatique-chaussée	53
3.2.1. Sources des forces pneumatique-chaussée	54
3.2.2. Modèles linéaires.....	56
3.2.3. Modèles non linéaires.....	56
3.3. Force normale et transfert de charge	61
3.4. Modèle du véhicule	62
3.4.1. Mouvement du véhicule	62
3.4.2. Expressions du modèle du véhicule.....	63
3.4.3. Evaluation du comportement du modèle	64
4. Modélisation de l'infrastructure	66

4.1. La courbure.....	67
4.2. Le dévers	68
4.3. La pente	68
5. Caractéristiques du conducteur	68
5.1. Temps de réponse	69
5.2. Mobilisation de l'adhérence disponible.....	70
5.3. Accélération longitudinale et latérale	70
6. Conclusion.....	72
Chapitre 5 : Estimation des paramètres du véhicule	75
1. Introduction	75
2. Angle de dérive	75
2.1. Impact de l'angle de dérive sur la stabilité du véhicule	76
2.2. Calcul de l'angle de dérive pour un modèle de véhicule bicyclette	77
2.3. Phénomène de sous et sur virage.....	80
2.4. Méthode d'estimation de l'angle de dérive	81
3. Estimation des efforts du vent	81
3.1. Modèle pour l'observation	82
3.2. Observabilité et problème numérique.....	83
3.3. Estimation des forces et moments par deux observateurs	84
4. Modèle de véhicule - Validation en temps réel.....	84
4.1. Modèle des forces d'interaction roue-sol	85
4.2. Validation	86
5. Estimation	89
5.1. Filtre de Kalman Etendu.....	90
5.2. Etude d'observabilité.....	91
5.3. Validation du filtre de Kalman	92
5.4. Estimation de l'état dynamique	95
5.5. Estimation des forces de contact roue-sol	96
5.6. Estimation de l'angle de dérive	98
5.7. Adaptation des raideurs pneumatiques	100
5.8. Ré-estimation de l'angle de dérive	102
5.9. Sensibilité de l'observateur vis-à-vis les paramètres du véhicule	103
6. Validation expérimentale.....	104
6.1. Zone d'expérimentation.....	104
6.2. Résultats	105
7. Conclusion.....	106

Partie III : Développement du système d'alerte à des vitesses excessives 107

Chapitre 6 : Développement théorique du système d'alerte.....	109
1. Introduction	109
2. Conditions assurant une conduite sécurisée.....	110
2.1. Conditions liées à l'environnement	111
2.2. Conditions liées à l'infrastructure	112
2.3. Conditions liées au trafic	112
2.4. Conditions liées au véhicule.....	112
3. Détermination de la distance d'arrêt, de visibilité et intervéhiculaire	112
3.1. Distance d'arrêt du véhicule.....	113
3.1.1. Distance de freinage	113
3.1.2. Distance de perception réaction.....	113
3.2. Distance de visibilité	114
3.2.1. Distance de visibilité atmosphérique.....	115
3.2.2. Distance de visibilité géométrique	116
3.3. Distance intervéhiculaire.....	118
3.4. Conditions limites de conduite	119
4. Développement théorique des conditions limites.....	119
4.1. Condition sur l'environnement.....	119
4.1.1. Le vent.....	120
4.1.2. La visibilité atmosphérique	121
4.2. Condition sur le véhicule.....	122
4.3. Condition sur le conducteur.....	123
4.4. Condition sur l'infrastructure	123
4.4.1. Le devers, la courbure et l'adhérence.....	123
4.4.2. La pente	123
4.4.3. L'accotement et l'angle saillant.....	124
4.5. Sensibilité de la vitesse aux variations des paramètres	124
4.6. Synthèse.....	125
5. Développement des fonctions d'ajustement et des Look-Up-Tables.....	126
5.1. Vitesse et visibilité atmosphérique.....	126
5.2. Vitesse et angle de dérive	127
5.3. Vitesse et visibilité géométrique	128
5.4. Vitesse et rayon de courbure	128
5.5. Vitesse et temps de réponse.....	129

6. Algorithme principal et simulation de quelques scenarios	130
7. Conclusion.....	136
Chapitre 7 : Risque de collision et validation expérimentale	137
1. Introduction	137
2. Risque de collision lors d'une sortie de voie.....	137
2.1. Description du système.....	137
2.2. Evaluation.....	140
3. Introduction de la possibilité de collision dans le système d'alerte.....	140
3.1. Développement d'une LUT correspondant à la possibilité de collision.....	141
3.2. Ajout de la possibilité de collision à l'algorithme principal du système.....	141
4. Validation expérimentale.....	143
4.1. Piste d'expérimentation	144
4.2. Véhicule d'expérimentation	144
4.3. Interface Homme-Machine.....	145
4.4. Résultats de l'expérimentation	146
5. Etude de l'acceptabilité.....	150
6. Conclusion.....	150
Conclusion générale.....	151

PARTIE I : INTRODUCTION ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

La sécurité routière est l'affaire de tous. Déclarée cause nationale, elle est d'intérêt majeure pour le Ministère en charge de l'Équipement. Elle préoccupe de nombreuses associations de prévention des accidents, les constructeurs d'automobiles, et bien sûr de nombreux utilisateurs. Dans ce but, le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions-Véhicule-Infrastructure-Conducteur), une unité mixte entre le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées) et l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), a pour objectif d'étudier les problèmes d'interaction entre le véhicule et son environnement (infrastructure et météorologie) ainsi qu'avec le conducteur.

La thèse s'est déroulée au LIVIC dans l'équipe Risque Décision Action qui a pour objectif de définir les différents risques routiers, de prendre les décisions nécessaires et ensuite de générer les actions correspondantes à chacune de ces situations critiques. La recherche des situations critiques se commence par une étude d'accidentologie pour expliquer les causes et les effets principaux des accidents routiers. Cette étude est fondée sur les statistiques établies à partir des différents cas et situations critiques provenant des routes en France.

Ces statistiques montrent que la vitesse excessive est la cause principale des accidents routiers. Le dépassement des limitations de vitesse, même s'il est globalement en retrait en 2007, reste un comportement courant puisqu'il concerne environ 37 % des automobilistes, 47 % des conducteurs de poids lourds et 55 % des motocyclistes, tous réseaux confondus. Les dépassements de plus de 10 km/h de la vitesse limite autorisée sont en baisse sensible pour les véhicules légers en 2007, mais en hausse pour les autres catégories observées. Ils s'élèvent à 13,7 % pour les véhicules de tourisme (contre 15,4 % en 2006), à 14,4 %, pour les poids lourds hors autoroutes (13,7 % en 2006) et 33,6 % pour les motos (contre 30,2 % en 2006).

En ce qui concerne la vitesse moyenne pratiquée de jour par les automobilistes en France, on observe qu'entre 2002 et 2007, elle a baissé de près de 8 km/h, passant de 89,5 km/h à 81,6 km/h tous réseaux confondus. Si l'ensemble des conducteurs respectait les limitations de vitesse, ce seraient près de 5 km/h qui seraient gagnés sur la vitesse moyenne pratiquée, soit une proportion de l'ordre de 20 % de tués en moins, c'est-à-dire, si l'on se réfère aux chiffres de l'année 2007, environ 900 vies sauvées.

Les accidents où la vitesse excessive est en cause impliquent souvent un seul véhicule et un conducteur qui prend des risques. La conséquence principale d'une vitesse excessive est la sortie de route. En effet, les statistiques faites au Canada en 2008 montrent que 32% des accidents où la vitesse excessive est en cause, entraîne une sortie de route du véhicule.

Cela permet de justifier le travail de recherche à suivre pour assurer une bonne sécurité routière. Ainsi, l'objectif de cette thèse est de poursuivre les travaux existants au LIVIC, dans l'équipe Risque

Décision Action, sur la définition d'une vitesse intégrant différents indicateurs relatifs à l'environnement de la conduite, afin de réduire le risque de sortie de voie par perte de contrôle suite à une vitesse excessive. La vitesse, ainsi obtenue, peut servir à renseigner une assistance à la conduite qui va alerter le conducteur en cas de vitesse supérieure à la limite. Elle peut aussi être utilisée par le gestionnaire de l'infrastructure afin de comparer les recommandations de vitesses sur un tracé avec le profil obtenu et définir une marge de sécurité, voir même des points noirs insuffisamment signalés.

Les systèmes d'alerte déjà existant sont multiples. Ils déterminent la vitesse limite du véhicule en fonction d'une caractéristique précise puis fournissent l'information au conducteur. Cependant, ces systèmes ne considèrent pas tous les paramètres pouvant influencer sur la vitesse : le comportement dynamique du véhicule, le type de conducteur, l'état de l'environnement et les caractéristiques de l'infrastructure. Ils sont aussi limités du fait de la dynamique étudiée pour l'alerte : soit longitudinale (Cruise Control [1], Curve Warning Assistance [2], Rear Warning System [3], ...), soit latérale (Lane Departure Warning System, Lane Keeping Assistance [4], ...) mais rarement dans les deux modes.

En plus, le fonctionnement des systèmes d'alerte existants est aussi limité par les capacités du conducteur. Le fonctionnement dépend de l'accélération latérale du véhicule. Dans les conditions normales, sur un intervalle de 0 à 6 m/s², le véhicule est toujours dans une situation contrôlable, sa stabilité est assurée par le conducteur, pour des faibles accélérations, ou par les systèmes d'assistance à la conduite qui interviennent pour éviter la possibilité de sortir de la route. Dans le cas d'un intervalle d'accélération latérale supérieure à 6 m/s², le fonctionnement de ces systèmes sera limité, le conducteur n'a pas l'habitude cette plage de sollicitations et éprouvera des difficultés à contrôler le véhicule. Une solution efficace pour cette problématique sera de conserver la dynamique du véhicule dans la zone contrôlable par le conducteur ou les systèmes d'assistance à la conduite. Cela revient à maintenir l'accélération latérale du véhicule dans l'intervalle de 0 à 6 m/s². Cette accélération étant liée proportionnellement à la vitesse, nous chercherons donc à maintenir la vitesse du véhicule inférieure à une limite définie en fonction des caractéristiques extérieures de la conduite.

Certaines approches ont été développées pour calculer la vitesse limite du véhicule et fournir un système d'alerte prenant en considération tous les paramètres nécessaires que ce soit pour le mode longitudinal ou latéral ainsi que les couplages résultants. Cependant, ces systèmes ne considèrent jamais les caractéristiques de l'environnement, l'infrastructure, le conducteur et la dynamique du véhicule. D'où, notre objectif est d'accomplir cette tâche manquante. Ainsi, le travail se divise en trois parties principales :

La première partie comporte l'état de l'art sur la sécurité routière en France ainsi que dans les pays voisins. Cette recherche bibliographique est importante pour comprendre et qualifier les différents cas d'usage du système d'alerte développé. Les méthodes de calcul et les outils nécessaires pour notre travail sont aussi présentés dans cette partie.

La deuxième partie consiste à préparer les données nécessaires pour le système d'alerte. En effet, parmi les paramètres influents sur la vitesse, certains peuvent être mesurés par des capteurs mais d'autres ne le sont pas. Nous élaborons donc dans cette partie des méthodes d'estimations pour déterminer les paramètres nécessaires : nous nous limitons à l'estimation de l'angle de dérive qui est un paramètre important pour déterminer la stabilité du véhicule.

Le vent étant un facteur perturbateur de la conduite, il sera aussi traité dans cette partie. En fait, l'étude de l'effet du vent sur le calcul de la vitesse limite du véhicule peut être abordée selon deux approches La première est la détermination des efforts du vent et l'introduction de ces efforts dans la

dynamique du véhicule, la seconde est l'étude de l'effet des efforts du vent sur la mobilisation de l'adhérence disponible sur la route.

La première approche est traitée dans cette partie, ce qui nécessite de développer une méthode d'estimation des efforts du vent pour les introduire dans la dynamique du véhicule.

La troisième partie est dédiée au développement du système d'alerte en se basant sur les deux premières parties ainsi que d'autres développements théoriques nécessaires qui permettent de lier la vitesse aux différents facteurs considérés. Le système a été implanté sous SimuLink/MatLab et nous avons testé quelques scénarios principaux représentant des différentes situations critiques de la conduite. Ensuite, nous traitons dans cette partie le risque de collision dans le cas d'une sortie de voie.

Le développement théorique du système d'alerte a été ensuite validé par des expérimentations sur un véhicule prototype du LIVIC.

La méthodologie suivie pour achever cet objectif de recherche nous a permis d'aboutir à des résultats significatifs nécessitant à faire des expérimentations afin de vérifier le fonctionnement du système en temps réel. En effet, les résultats des estimations faites au cours de la deuxième partie représentent l'estimation de l'état dynamique du véhicule, composé de la vitesse longitudinale, la vitesse latérale et la vitesse de lacet. Ensuite nous avons estimé les efforts de contact pneumatique-chaussée en longitudinal et en latéral. Enfin, nous avons obtenu les résultats de l'estimation de l'angle de dérive pour l'introduire comme une entrée pour le système d'alerte. Au cours de ce travail, nous avons aussi pu déterminer les valeurs des raideurs des pneumatiques du véhicule.

En ce qui concerne le développement du système d'alerte, nous avons déterminé dans un premier temps les différents facteurs influents sur la vitesse du véhicule et pour que nous puissions choisir les facteurs principaux à étudier dans notre travail. Nous avons étudié la sensibilité de la vitesse vis-à-vis de ces facteurs. Enfin, nous avons développé le lien théorique entre la vitesse et les facteurs considérés. L'implémentation de l'algorithme du système d'alerte, sous SimuLink/MatLab, nous a permis de le tester pour quelques situations critiques telles que la conduite en temps de pluie, de brouillard, en virage, en faible adhérence, etc.

La réaction du conducteur n'étant pas assurée, il y a donc une possibilité qu'il ne fasse pas attention ou qu'il ne réagisse pas à l'alerte générée par le système. Nous allons aussi considérer cette situation critique, et pour cela, nous allons étudier la possibilité de collision avec un autre véhicule lors de la sortie de voie. Dans ce but, nous avons calculé la probabilité de collision dans deux cas principaux : sortie de voie sans modification de la vitesse et sortie de voie avec prise en compte de la réaction du conducteur.

Ce mémoire est organisé en 7 chapitres.

Le chapitre suivant présente l'état de l'art sur les systèmes d'alertes et la sécurité routière en France. Ce chapitre permet donc d'encadrer le sujet de la thèse et de délimiter le travail pour le développement d'un système d'alerte pour des vitesses excessives.

Le chapitre 3 représente l'architecture générale du système d'alerte proposée sous une nouvelle approche de calcul de la vitesse limite. Ainsi, ce chapitre développe les différentes méthodes de calcul utilisées, les capteurs nécessaires et les méthodes d'estimations des paramètres non mesurables.

Le chapitre 4 propose une modélisation du système Véhicule-Infrastructure-Conducteur. Cette modélisation est nécessaire pour comprendre l'interaction entre les trois systèmes. La modélisation du

véhicule est importante pour le travail d'estimation à faire, la modélisation du conducteur permettra de déterminer les facteurs qui le représentent dans le système d'alerte et la modélisation de l'infrastructure servira à définir les paramètres qui pourront influencer sur la vitesse du véhicule.

Le chapitre 5 est dédié à l'estimation de l'angle de dérive du véhicule. Nous estimons aussi les efforts du vent appliqués sur le véhicule. Ces paramètres seront introduits dans le système d'alerte développé. La validation expérimentale des estimations est aussi présentée dans ce chapitre.

Le chapitre 6 porte sur le développement théorique nécessaire à l'élaboration du système. Nous présenterons aussi les résultats de la simulation de quelques scénarios sur MatLab.

Enfin, dans le chapitre 7, une étude de la probabilité de collision est présentée pour tenir compte du cas où le conducteur ne réagit pas au système d'alerte et que le véhicule effectue une sortie de voie. Une implantation a été réalisée sur un véhicule prototype du LIVIC pour valider les développements théoriques.

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART

1. Introduction

L'étude du risque lié à la sortie de route des véhicules représente une part importante des recherches menées dans le cadre de la sécurité routière.

Les statistiques issues des études d'accidentologie, en France et dans d'autre pays, nous permettent de définir un certain nombre de scénarios d'accidents et donc de mieux définir les causes et les mécanismes. Une conclusion principale peut être déduite de ces études : l'excès de vitesse est la cause principale d'une sortie de route.

L'Etat, les laboratoires de recherche scientifiques, les constructeurs d'automobiles et d'autres ont déjà contribué pour la lutte contre l'insécurité routière et surtout l'excès de vitesse. Des limitations nationales, des systèmes d'alerte, des systèmes d'aide à la conduite, etc. ont permis de diminuer les accidents. Cependant les accidents persistent toujours, donc il faut continuer la recherche dans le but de mieux adapter la vitesse à la situation de conduite.

Deux questions principales se posent ici : Pourquoi a-t-on un excès de vitesse, ou une vitesse inadaptée à la situation ? Et pourquoi cet excès de vitesse peut entraîner une sortie de route ? Dans ce chapitre, nous allons donc essayer de répondre à ces deux questions et représenter les différentes actions prises dans le but de l'amélioration de la sécurité routière.

2. Accidentologie

En 2008, le bilan provisoire de l'insécurité routière pour la France métropolitaine [5] s'élevait à 73 390 accidents corporels, 4 274 personnes tuées et 91 669 blessés dont 32 930 blessés hospitalisés, ce qui représente par rapport à 2007, des baisses de 9.7 % du nombre d'accidents, de 7.5 % pour le nombre de personnes tuées, de 11.2 % du nombre de personnes blessés et de 14.7 % pour le nombre de blessés hospitalisés (Fig. 2.1). Cette forte augmentation de la baisse annuelle du nombre de personnes tuées sur la route (7.5 % après 2 % en 2007) est toutefois légèrement en dessous des 8.2 % de baisse moyenne par an que nécessiterait l'objectif fixé par le Président de la République de limiter à 3000 le nombre de personnes tuées en 2012. Les progrès de l'année 2008 sont principalement dus au ralentissement du trafic et à la forte baisse des vitesses (-1.1 % de baisse de la vitesse moyenne).

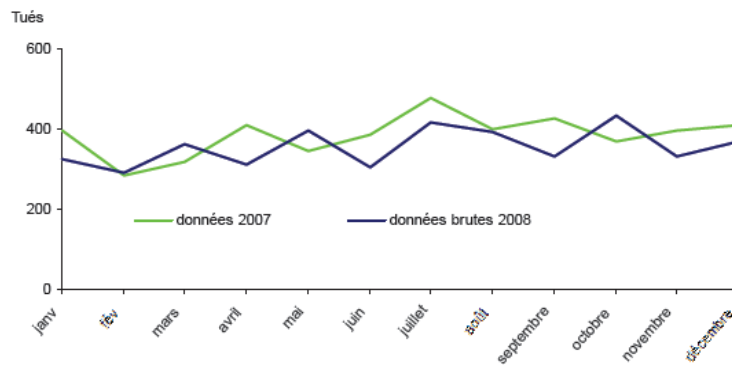


Fig. 2.1 : Nombre de tués par des accidents routiers en France

Une comparaison entre la France et les pays membres de l'Union européenne sur le nombre des personnes tuées par des accidents de la route en 2006 [6], montre que la France représente le chiffre moyen entre ces pays (Fig. 2.2). Il est donc nécessaire de faire évoluer la sécurité routière en France pour qu'on puisse atteindre un niveau plus sûr en Europe.

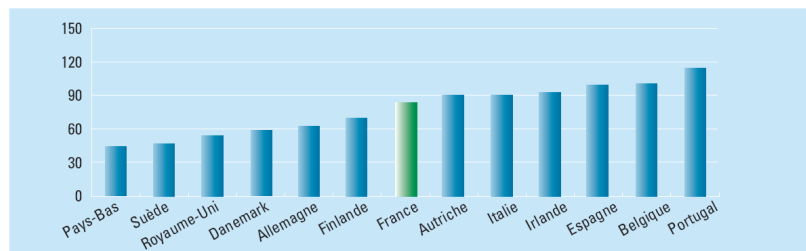


Fig. 2.2 : Nombre de tués par des accidents routiers en Europe

3. Vitesse et sortie de route

3.1. L'enjeu de la vitesse

La vitesse est un facteur déterminant ou aggravant d'un accident et peut être mise en cause dans un accident mortel sur deux. Si on accepte de réduire sa vitesse de 5 km/h, cela nous permettrait de diminuer de 30 % le nombre de tués en cas de choc frontal entre deux véhicules [8]. Le temps gagné avec une vitesse plus élevée est toujours surévalué. Il s'élève à 6 minutes quand on roule sur une autoroute en continu à 150 km/h au lieu de 130 km/h pendant 100 km, hors arrêts et ralentissements. Ce gain vaut-il la peine de prendre des risques ?

Les statistiques de l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière pour l'année 2008 [5] présentent le pourcentage de la vitesse moyenne pratiquée par les conducteurs en France (Fig. 2.3). Les résultats représentés par (Fig. 2.3) montrent que la vitesse moyenne pratiquée par les conducteurs a diminué de 90,5 km/h à 80,4 km/h, entre l'année 2002 et 2008. Les grands excès de vitesse ont fortement diminué dans la même période. Cela explique l'amélioration de la sécurité routière en France. Néanmoins le nombre d'accidents reste toujours élevé.

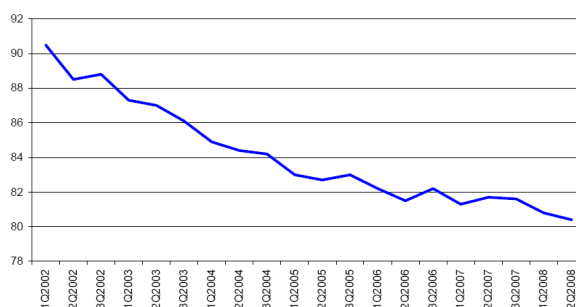


Fig. 2.3 : Vitesse moyenne pratiquée par 85 % des conducteurs en France

Le problème principal de la vitesse est la pratique d'une vitesse inadaptée aux conditions de la conduite. Les principales inadaptations rencontrées sur les route en France se résument par :

- L'inadaptation au tracé de la route.
- L'inadaptation aux conditions de la route.
- L'inadaptation aux conditions du trafic.
- L'inadaptation aux conditions de visibilité (influence du temps, de la luminosité et de la géométrie).
- Le dépassement du maximum de manière prépondérante.
- Autre attitude fautive ayant trait à la vitesse.

Les résultats des statistiques d'accident sont représentés par (Fig. 2.4). On remarque, d'après cette figure, que le cas d'une vitesse inadaptée au tracé de la route est le plus fréquent avec un pourcentage de 36,9 % suivie de 24,4 % pour une vitesse dépassant le maximum de manière prépondérante. Les autres cas se répartissent avec des pourcentages inférieurs à 15 %.

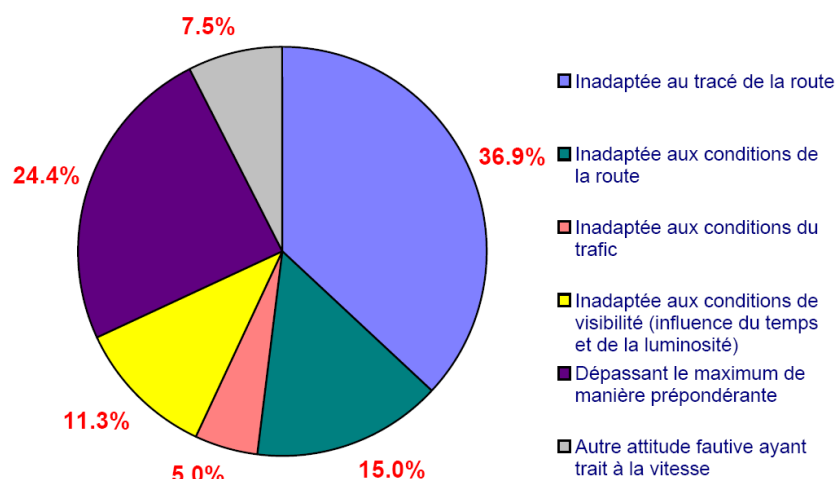


Fig. 2.4 : Pourcentage d'accidents liés à l'inadaptation de la vitesse

Les chiffres présentés ci-dessus permettent de définir trois cas principaux liés à la vitesse : la vitesse inadaptée au tracé de la route, la vitesse dépassant le maximum et la vitesse inadaptée aux conditions de la route. Ces trois cas nous définissent trois problèmes à résoudre tous dépendants de la vitesse.

Aux règles de conception routière sont associées les vitesses limites pour les usagers. Le premier problème est alors l'inadaptation de la vitesse au profil de la route. Cela est souvent le cas d'un virage, d'un angle saillant, etc. En virage, il n'est pas facile pour le conducteur de déterminer la

vitesse appropriée pour le virage en question. Par contre, les conducteurs sous-estiment souvent leur vitesse ou sous-estiment la dangerosité du virage, leur vitesse est souvent inadaptée aux conditions géométriques. Il est donc nécessaire de les aider à adapter leur vitesse au virage à venir.

Le second problème est la vitesse dépassant la limite légale. En fait, la vitesse du véhicule change en fonction du type de la route. C'est à dire, la vitesse du véhicule n'est pas la même en ville que sur l'autoroute, sur des petites ruelles et sur des grandes rues urbaines, etc. Ainsi, le conducteur doit adapter la vitesse de son véhicule selon le type de route. Cela lui permettra d'assurer une conduite sûre. Les statistiques montrent que le taux de dépassement de la vitesse maximale de plus de 10 km/h est de 10,9 %. Dans ce cas . Notre rôle est alors de l'aider à maintenir sa vitesse en-dessous de la vitesse limite.

Le troisième problème à étudier est le cas où la vitesse du véhicule est inadaptée aux conditions de la route. En effet, l'état de la route change avec le temps : l'état de la chaussée se dégrade, l'adhérence change avec les conditions atmosphériques (pluies, neige, glace...), etc. Ces facteurs exigent une modification de la vitesse pour conserver une conduite sécurisée. En fait, une route avec une adhérence plus faible nécessite de réduire la vitesse pour empêcher le glissement du véhicule. Le conducteur n'étant pas toujours capable d'adapter sa vitesse en fonction de ces facteurs, la solution est donc de lui permettre de savoir la vitesse qu'il faut pratiquer à chaque instant.

3.2. La sortie de route : conséquence d'une vitesse excessive

La sortie de route des véhicules est fortement liée à la vitesse pratiquée par le conducteur. En effet, elle est la conséquence de la vitesse excessive. Cela peut être vérifié réellement par des statistiques faites sur les routes et même théoriquement en étudiant la dynamique du véhicule.

Selon les statistiques faites au Canada en 2008 [110], les accidents pour lesquels la vitesse excessive est en cause impliquent souvent un seul véhicule et un conducteur qui prend des risques. Ces statistiques montrent que la sortie de route est la conséquence principale de l'excès de vitesse. Plus de 30 % des décès et 17 % des blessures graves associées à la vitesse excessive étaient le résultat d'un tel accident. La (Fig. 2.5) représente le nombre de tués dans des accidents où la vitesse excessive était en cause, par type de collision. Sur cette figure, le pourcentage le plus élevé est égal à 32 % ce qui correspond à la sortie de route.

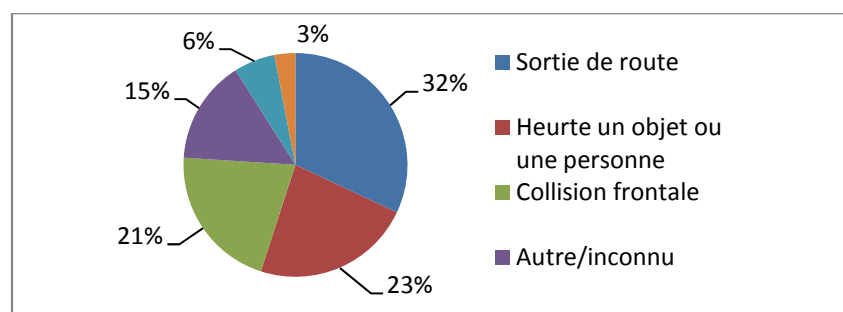


Fig. 2.5 : Pourcentage des tués dans des accidents où la vitesse excessive était en cause (par type de collision)

Si on étudie la relation entre l'accélération latérale du véhicule et sa vitesse tout le long d'un virage, on remarque que l'accélération augmente avec la vitesse. La (Fig. 2.6) représente la variation de l'accélération latérale en fonction de la vitesse longitudinale du véhicule pour trois virages de rayons différents : 10 m, 100 m, et 300 m. sur cette figure on peut identifier quatre plages d'accélérations transversales ou latérales.

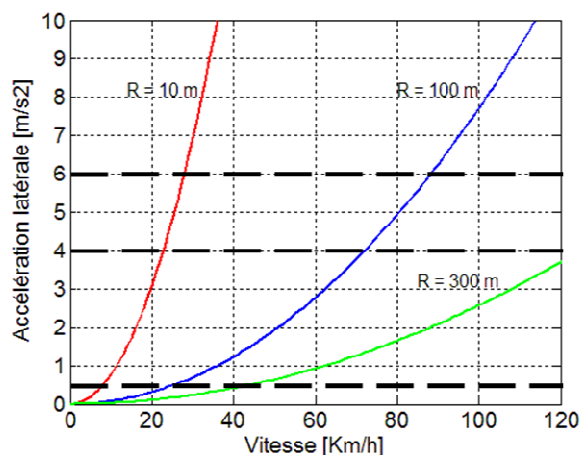


Fig. 2.6 : Variation de l'accélération latérale en fonction de la vitesse et le rayon de courbure

La plage de 0 à 0,5 m/s² est appelée plage de petits signaux. Elle concerne le comportement de réaction en ligne droite à des sollicitations de type « ornières » ou « vent latéral ». Les sollicitations de type vent latéral correspond à des rafales ou bien au passage d'une zone abritée à une zone non abritée ou inversement. La plage de 0,5 à 4 m/s² est appelée plage linéaire. Le comportement du véhicule peut ici être étudié à l'aide du modèle demi-véhicule linéaire. Les phénomènes étudiés sont entre autres les réactions transitoires de lacet, les changements de voie et les combinaisons de mouvements dynamiques transversaux et longitudinaux tels que les réactions aux transferts de charge dans les virages.

Dans la plage de 4 à 6 m/s², les voitures se comportent suivant leur conception encore de façon linéaire ou déjà de façon non linéaire. Cette plage d'accélération transversale est pour cette raison appelée plage transitoire. Les véhicules dont l'accélération transversale maximale est de 6 à 7 m/s² (véhicules tout-terrain p. ex.), se comporte ici déjà de façon non linéaire alors que les véhicules conçus pour supporter des accélérations transversales supérieures (voiture de sport p. ex.) restent plus stable à ces vitesses. La plage située au-delà de 6 m/s² n'est atteinte que dans des situations extrêmes par rapport aux compétences des conducteurs, elle est pour cette raison appelée plage limite. Le comportement des véhicules est ici fortement non linéaire et la stabilité des véhicules joue un rôle primordial. Cette plage est atteinte sur les circuits de course ou en circulation routière normale dans les situations d'accident.

En conduite normale, les accélérations transversales ne dépassent généralement pas 4 m/s², ce qui veut dire que la plage de petits signaux et la plage linéaire sont déterminantes pour l'appréciation subjective du comportement dynamique par les automobilistes. Ces deux plages définissent alors la zone de conduite normale où le véhicule est contrôlé par le conducteur. La troisième plage définit la zone de conduite critique (possibilité de sortie de la voie) où les systèmes d'aide à la conduite interviennent pour assurer la stabilité du véhicule. La dernière plage est la zone d'accident inévitable dont les conducteurs normaux n'ont pas l'habitude de s'y retrouver et de contrôler le véhicule même avec les systèmes d'assistance à la conduite (on a une sortie de voie). On a donc intérêt à rester toujours dans la zone de conduite normale correspondante à une accélération transversale inférieure à 4 m/s².

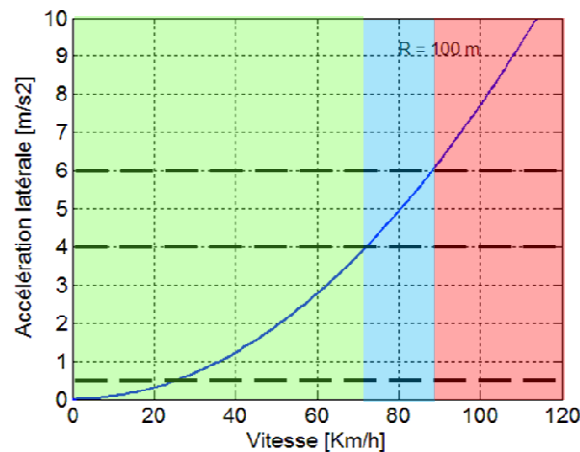


Fig. 2.7 : Variation de l'accélération latérale en fonction de la vitesse

Pour mieux identifier le lien entre vitesse et sortie de route, on s'intéresse au cas d'un virage de rayon de courbure égale à 100 m (Fig. 2.7). Sur la (Fig. 2.7) on remarque l'existence de trois intervalles au niveau de la vitesse :

L'intervalle de 0 à 70 km/h présente une accélération transversale inférieure à 4 m/s², ce qui correspond alors à la zone de conduite normale. Sur cet intervalle, le véhicule est toujours contrôlé par le conducteur. L'intervalle de 70 à 90 km/h correspond à la zone de conduite critique au niveau de l'accélération transversale. Sur cet intervalle, la stabilité du véhicule est assurée par les systèmes d'assistance à la conduite. Ces systèmes interviennent pour éviter la possibilité de sortir de la route. L'intervalle des valeurs supérieures à 90 km/h correspond, au niveau de l'accélération transversale, à la zone des situations d'accident. Dans ce cas, le véhicule n'est plus contrôlable par un conducteur moyen. Cependant, nous pouvons toujours développer des systèmes d'assistance à la conduite pour éviter une sortie de voie évidente.

On peut ainsi conclure de ce que nous avons présenté ci-dessus que pour éviter la sortie de route il faut garder l'état dynamique du véhicule dans les zones contrôlables par le conducteur ou les systèmes d'assistance à la conduite. Par conséquent, il faut maintenir la vitesse du véhicule dans l'intervalle de sécurité correspondant au virage désiré. Ainsi, l'objectif de notre travail consistera à adapter la vitesse du véhicule aux conditions de conduites variées et donc, de tracer un profil de vitesse maximale du véhicule à chaque instant de la conduite et de développer un système qui alerte le conducteur dans le cas d'une vitesse pratiquée supérieure à la vitesse maximale.

4. Limitation de la vitesse

4.1. Méthodes de calcul de la vitesse limite

Les accidents sont des événements plutôt rares pour un conducteur. Il lui est donc extrêmement difficile de réaliser les risques que représente, pour soi et pour les autres, le fait d'adopter une vitesse donnée en certains endroits et en certaines conditions. C'est pour cette raison que les limites de vitesse ont été établies pour inciter les conducteurs à adopter une conduite sécuritaire pour l'ensemble des usagers de la route en limitant la vitesse maximale permise; et une vitesse prescrite et convenable qui tient compte de la situation (environnement routier, température, conditions routières).

Plusieurs études ont été déjà faites pour établir un modèle permettant de déterminer la vitesse limite du véhicule en prenant en considération les facteurs ci-dessus. Parmi ces études, on peut considérer deux approches principales :

La première approche est définie par les systèmes nationaux de limitations de vitesse. Cette méthode consiste à déterminer la vitesse appropriée selon le type de la route, le type du véhicule,...on définit alors des limitations de vitesse locales. Dans certaines conditions, il est important de définir des limitations de vitesse variables ou dynamiques, selon l'heure (jour ou nuit), la saison (hiver ou été), l'état réel du trafic et les conditions météorologiques.

La deuxième approche est l'utilisation des modèles : la vitesse limite des véhicules peut être déterminée par un calcul mathématique qui prend en compte la dynamique du véhicule et son interaction avec l'environnement extérieur, c'est le cas des modèles mathématiques. On peut aussi déterminer la vitesse limite de circulation en faisant une étude sur le terrain des conditions de la conduite en temps réel et par la suite, on pourra proposer la valeur limite de la vitesse en fonction des facteurs influents. C'est le cas des modèles réels.

4.1.1. Systèmes nationaux de limitations de la vitesse

Plusieurs critères sont généralement utilisés dans les différents pays pour définir des limitations générales de vitesse. Ces systèmes se basent sur la détermination de la vitesse limite selon le type de la route et celui du véhicule [11].

Limitations de vitesse selon les types de route

La diversité des types de routes en France, ainsi que dans tous les pays, nécessite différentes valeurs de la vitesse limite de circulation. Du fait des règles de construction, les limitations de vitesse peuvent être plus élevées sur les routes principales (autoroutes,...) que sur les autres routes secondaires (voies urbaines,...) qui répondent à moins de contraintes et pour lesquelles des situations plus critiques peuvent être envisagées. Le (Tab. 2.1) explicite la vitesse appropriée pour différents types de routes.

Type de route	Agglomération	Route	express	Autoroute
Vitesse limite [km/h]	50	90	110	130

Tab. 2.1 : Vitesse limite autorisée en France selon le type de route

D'autres limites peuvent être indiquées pour les jeunes conducteurs, certains types de véhicules (poids lourds, remorques), et dans certaines conditions environnementales.

Limitations de vitesse selon les types des véhicules

La présence de différentes catégories de véhicules et de vitesse de circulation a un impact sur la sécurité. Par exemple, les poids lourds ne peuvent pas circuler à la même vitesse que les véhicules légers, car pouvant entraîner une situation à risque. Pour cela, on applique des limitations de vitesse différentes pour chaque type de véhicule. Les limitations sur certains types de véhicules (les poids lourds par exemple) peuvent aussi dépendre du type de la route.

4.1.2. Modèle mathématique

Les modèles mathématiques consistent à calculer la vitesse limite en étudiant la dynamique complexe du véhicule ainsi que son interaction avec le milieu extérieur et en utilisant les équations classiques de la mécanique. La première équation établie pour calculer la vitesse du véhicule en fonction de la géométrie de la route est celle qui détermine la vitesse en virage. En négligeant tout autre paramètre que la courbure, la vitesse maximale à laquelle un véhicule peut aborder un virage de courbure ρ_{route} , à vitesse constante, est donnée par :

$$V = \sqrt{\frac{g\mu}{\rho_{route}}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Où g est l'accélération de la gravité et μ est l'adhérence maximale disponible en latéral. μ est fonction des caractéristiques de l'interface pneumatique chaussée. La description de la route peut être plus précise, en prenant en compte le devers ϕ_{route} et le comportement du conducteur. Par exemple, la NHTSA recommande, pour l'élaboration et le développement d'un système d'alerte en virage [16], que la vitesse V maximale à l'approche du sommet d'un virage soit déterminée par l'équation :

$$V = \sqrt{\frac{g}{\rho_{route}} \left(\frac{\phi_{route} + \mu}{1 - \phi_{route}\mu} \right)} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Ensuite, l'accélération a , nécessaire pour faire passer un véhicule de la vitesse V , à n'importe quel point p en amont du sommet, à la vitesse V_c doit être inférieure à :

$$a = -\sqrt{\frac{V^2 - V_c^2}{2(d - t_r V)}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Où d est l'abscisse curviligne entre le point p et le sommet du virage et t_r le temps de réaction du conducteur. Les équations de la vitesse présentées ci-dessus, ont certains inconvénients, par exemple :

- La pente de la route qui a une influence forte sur la vitesse limite n'est pas prise en compte.
- Lorsque des virages se succèdent, la vitesse maximale dans le premier virage est définie par l'équation (Eq. 2.4). Mais dans certains cas, en particulier pour les routes rurales, la vitesse maximale dépend non seulement des caractéristiques du virage considéré, mais aussi des virages suivants.
- Les effets de la dynamique longitudinale sur la latérale ne sont pas pris en compte. Notamment, deux phénomènes sont omis : le premier est la dynamique longitudinale qui mobilise une partie de l'adhérence disponible. Le deuxième se présente lorsque le conducteur freine ou accélère, la répartition de masse change. Le transfert de charge a un impact sur la vitesse maximale à l'approche d'un virage.
- Des études sur le comportement du conducteur [17], montrent que, sur une route sèche, l'accélération latérale acceptable dans un virage se situe entre 0.2 et 0.4 g . De plus, si l'on considère un conducteur précis, ces études montrent que l'accélération latérale qu'il accepte, est quasiment constante et dépend peu de la vitesse.

En prenant en considération les conditions notées ci-dessus, et en les appliquant sur une modélisation du véhicule, on peut aboutir aux expressions de la vitesse limite [18] :

$$\begin{cases} \theta_{route} > 0 \\ V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 - \frac{H}{L_{av}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon} \mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat} \mu_{max} - \phi_{route} \right) \\ \theta_{route} < 0 \\ V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 + \frac{H}{L_{ar}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon} \mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat} \mu_{max} - \phi_{route} \right) \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Avec,

- θ_{route} : la pente de la route
- ϕ_{route} : le devers de la route
- ρ_{route} : la courbure
- μ_{max} : l'adhérence maximale disponible
- H : la hauteur du centre de gravité du véhicule
- L_{av} et L_{ar} : les distances entre le centre de gravité et les essieux avant et arrière respectivement
- λ_{lon} et λ_{lat} : les coefficients de mobilisation de l'adhérence par le conducteur

L'équation (Eq. 2.4) a été élaborée par [18]. Cette équation présente toujours le même problème qui consiste à considérer tous les facteurs qui influent sur la vitesse du véhicule, notamment ceux relatifs à l'environnement.

4.1.3. Modèle réel

Cette approche consiste en une étude sur le terrain des conditions de la conduite en temps réel et par la suite une proposition de la valeur limite de la vitesse en fonction de certains facteurs influents parmi ceux qui sont présentés ci-dessus. Parmi les recherches dans ce domaine, on peut citer la méthode de la pratique de vitesse en zone (Speed Zoning Practice), qui consiste à déterminer la vitesse pratiquée par 85 % des conducteurs (V85) pour la zone étudiée [109]. La vitesse V85 peut être exprimée en fonction du rayon de la route R ou la pente p . Cette vitesse peut aussi varier selon le nombre de voie de la route [111]. Le (Tab. 2.2) présente les différentes équations de la vitesse V85 sous la forme suivante :

	2 x 2 voies	2 et 3 voies	2 voies (5 m)
V85 (en fonction du rayon)	$120 / \left[1 + \left(\frac{346}{R^{1.5}} \right) \right]$	$102 / \left[1 + \left(\frac{346}{R^{1.5}} \right) \right]$	$92 / \left[1 + \left(\frac{346}{R^{1.5}} \right) \right]$
V85 (en fonction de la rampe)	$120 - 0.31p^2$	$102 - 0.31p^2$	$92 - 0.31p^2$

Tab. 2.2 : Différentes équations de la vitesse V85

D'autres recherches statistiques ont été faites au cours de plusieurs projets nationaux et internationaux. Ces statistiques ont permis d'identifier la vitesse maximale permettant de suivre certaines trajectoires en toute sécurité. Ces projets seront détaillés plus loin.

4.1.4. Simulation et comparaison

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les profils de la vitesse limite qui garantissent une conduite sécurisée. Il est très important d'étudier les résultats de chaque méthode et de les comparer afin de déterminer le meilleur algorithme à suivre pour le calcul de la vitesse limite pour une situation bien précise. La comparaison de ces trois méthodes peut être faite par une application sur un scénario de conduite bien déterminé. Pour cela on choisit un profil de route pouvant solliciter le choix de la vitesse par le conducteur et donc le calcul de la valeur limite permise pour parcourir ce trajet. Par exemple, on peut considérer un trajet suivi par le véhicule constitué d'une ligne droite suivi d'une clothoïde qui précède un virage en courbure constante (arc de cercle). Ce type de trajet nous permet de déterminer à la fois la vitesse limite en ligne droite et en virage (Fig. 2.8). Nous pouvons aussi varier les valeurs des caractéristiques géométriques de l'infrastructure tout au long du trajet.

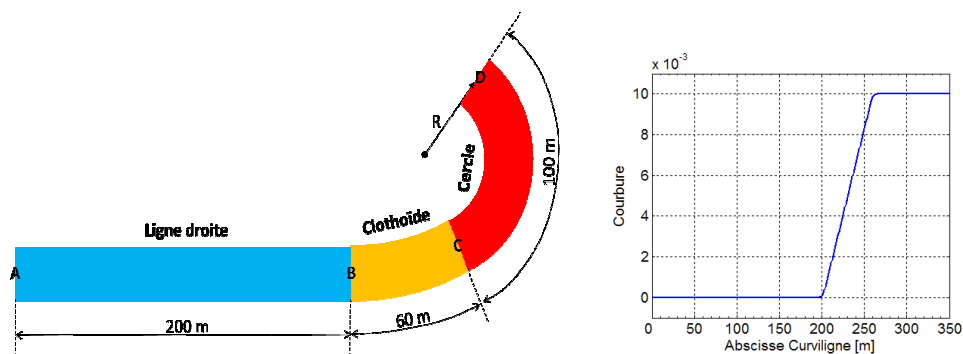


Fig. 2.8 : Profil et courbure de la trajectoire d'essai

Nous présentons dans le (Tab. 2.3) les caractéristiques nécessaires pour qu'on puisse appliquer les différentes méthodes de détermination du profil de la vitesse limite. L'évolution de la courbure du trajet choisi est présentée par la (Fig. 2.8).

	Courbure	Pente	Devers	Adhérence
A-B	0	0	-3%	0.8
B-C	de 0 à 0.01	0	de -3% à 3%	0.8
C-D	0.01	0	3%	0.8

Tab. 2.2 : Caractéristiques de la trajectoire choisie

L'application du principe des systèmes nationaux de détermination de la vitesse limite sur le trajet choisi, nous donne un tracé du profil de la vitesse limite définie par 90 km/h sur une ligne droite, ce qui présente la valeur maximale permise par l'état sur ce type de route. Sur la clothoïde, les réglementations limitent la vitesse à une valeur égale à 70 km/h. Ensuite, le passage sûr sur un virage de 100 m de rayon de courbure nécessite une vitesse maximale égale à 50 km/h (Fig. 2.9a).

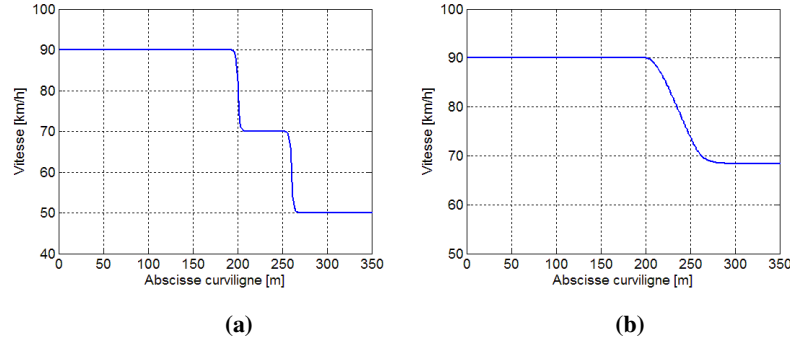


Fig. 2.9 : Vitesse limite calculée suivant les limitations nationales (a) et la méthode de V85 (b)

La détermination de la vitesse maximale par des modèles statistiques peut être délicate selon la complexité de l'environnement de mesures. Plus un modèle prend en considération des facteurs influents, plus il devient complexe. Il est donc nécessaire de faire un compromis entre la complexité et les facteurs utiles et indispensables pour la limitation de la vitesse.

Les premiers travaux dans le domaine de la définition de la vitesse limite ont pu déterminer la valeur de la vitesse en dessous de laquelle roulent 85% des conducteurs, c'est la notion de V85 :

$$120 / \left[1 + \left(\frac{346}{R^{1.5}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Si on représente le profil de la vitesse par cette équation on aura la courbe présentée par la (Fig. 2.9b). On peut remarquer que sur la clothoïde la décélération commence par une valeur faible et augmente à l'approche du virage circulaire, cela garantit une décélération confortable et une mobilisation minimale de l'adhérence existante. On évite donc d'avoir un risque d'accident. La vitesse se fixe après à une valeur moins que 70 km/h qui correspond à un parcours sécurisé du virage.

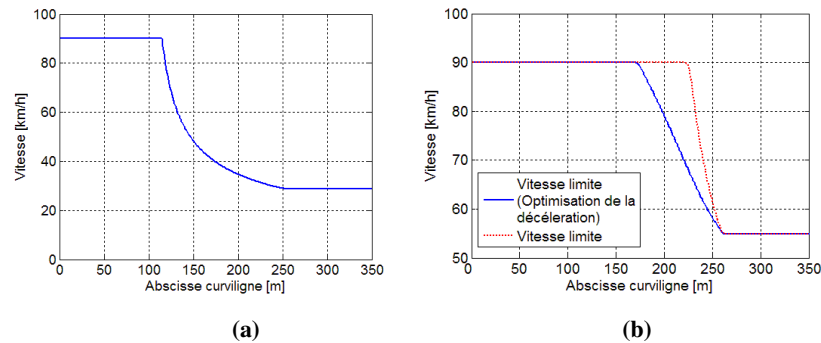


Fig. 2.10 : Vitesse limite calculée suivant l'équation de la NHTSA (a) et de la SAVV (b)

La dynamique du véhicule permet de donner une expression de la vitesse maximale sur un virage (Eq. 2.4). Si on représente le profil de la vitesse en se basant sur cette équation, on aura la courbe de la (Fig. 2.10a). Ce profil présente une forte décélération à l'approche d'un virage. Cette décélération diminue ensuite et s'annule pour rouler à une vitesse constante autour de 25 km/h.

Une étude faite par [18] pour générer un algorithme de détermination des situations critiques, permet de définir la valeur limite de la vitesse sur un virage. Les expressions de la vitesse (Eq. 2.6) prennent en compte plusieurs facteurs supplémentaires qui présentent la dynamique du véhicule, celui du conducteur ainsi que certaines caractéristiques de la route, tel que la pente, le devers, les

dimensions du véhicule, la modélisation des actions du conducteur. Les profils de la vitesse maximale sont alors présentés par la (Fig. 2.10b). On remarque qu'on a deux courbes, la première, en rouge (ligne continue), détermine le profil de la vitesse selon les équations (Eq. 2.4). La deuxième permet d'avoir une amélioration de la décélération qui devient moins forte et plus confortable, cela est fait par une optimisation qui limite la décélération à une valeur bien déterminée et qui garantit un freinage sûr et confortable.

Les systèmes nationaux de limitation de la vitesse sont limités à des considérations prises par l'Etat mais ne reflètent pas la valeur de la vitesse limite à l'instant de conduite. Dans le cas du calcul mathématique on a besoin d'un modèle du véhicule, du conducteur, de l'interaction roue/sol. Les facteurs considérés par cette approche sont simplifiés par l'adhérence de la route (facteur de l'infrastructure) sans aucune considération de l'environnement. Pourtant, cette méthode est très importante puisqu'elle peut être implémentée sur le véhicule pour calculer sa vitesse maximale suivant son type, les caractéristiques du conducteur,...elle servira alors comme un outil pour les systèmes d'alerte à des vitesses excessives.

Concernant le modèle réel, on n'a plus besoin du calcul compliqué de la dynamique. Il suffit de collecter les informations nécessaires pour comprendre les conditions qui définissent l'état de la conduite (l'infrastructure, l'environnement, le trafic, les types des véhicules,...), pour déterminer une vitesse limite au-dessous duquel doivent rouler tous les véhicules se trouvant dans la zone d'étude. Cette méthode peut être alors intégrée dans les cartes numériques implémentées sur les véhicules, et servira ainsi comme un indicateur de vitesse limite dans le véhicule. Elle nécessite néanmoins de multiplier les recueil afin d'avoir une représentativité suffisante.

4.2. Systèmes de lutte contre les vitesses excessives

Malgré les précautions prises par l'état, le nombre d'accidents dus à la vitesse excessive, reste toujours élevé. On a alors pensé à ajouter aux véhicules des systèmes permettant de limiter sa vitesse pour des situations considérées comme critiques et pouvant entraîner un accident. De nombreux systèmes sont déjà embarqués sur les véhicules et permettant la gestion de la vitesse. Ces systèmes restent toujours des fonctions limitées et ne peuvent pas prendre en considération toutes les conditions extérieures de la conduite (les caractéristiques de l'infrastructure, l'environnement, l'état du trafic,...). On remarque alors la nécessité d'élaborer des systèmes d'assistance plus avancés permettant de contrôler la vitesse du véhicule en temps réel dans toutes les conditions avec une coopération avec le conducteur.

Les constructeurs automobile se sont donnés pour objectif de réduire la fréquence et la gravité des accidents grâce au développement de systèmes d'assistance à la conduite. Ces derniers doivent permettre au véhicule de percevoir et d'interpréter son environnement, de détecter les situations dangereuses et d'aider le conducteur lors de la conduite. Leur finalité est d'éviter les accidents ou tout du moins de minimiser leurs conséquences pour les personnes impliquées.

Les systèmes d'assistance à la conduite se classent aussi suivant leurs domaines d'application (très nombreux, Fig. 2.11) en deux catégories : les systèmes de sécurité axés sur la prévention des accidents et les systèmes de confort devant permettre à plus ou moins long terme une « conduite semi-autonome ». On différencie par ailleurs : Les systèmes actifs, qui interviennent sur le comportement dynamique du véhicule et les systèmes passifs, qui informent le conducteur sans intervenir sur le véhicule. Les systèmes d'assistance à la conduite varient selon le type de fonctionnement qu'ils

assurent. Ainsi, ils peuvent être classés en trois catégories : les indicateurs, les systèmes d'alerte et les systèmes actifs.

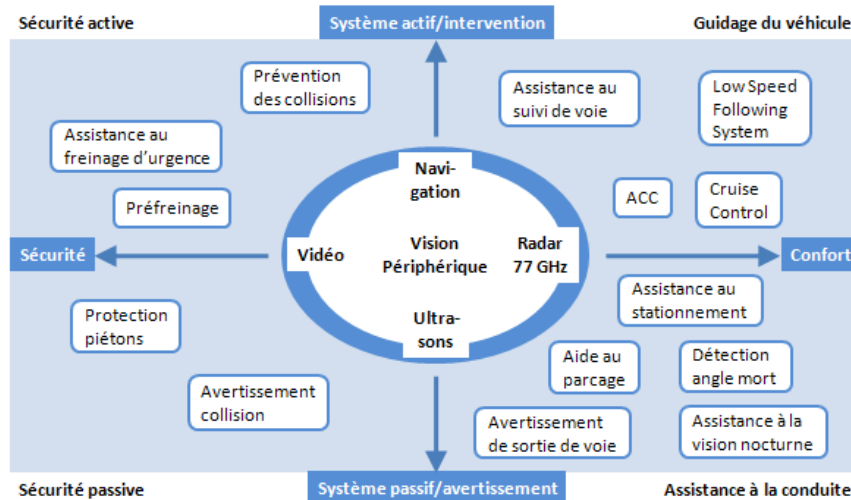


Fig. 2.11 : Fonctions de sécurité et de confort basées sur des capteurs de détection périphérique

4.2.1. Les indicateurs

On peut identifier plusieurs variables représentatives de situations à risque et utilisées pour le déclenchement d'un système d'assistance. Ces indicateurs peuvent être scindés en deux groupes selon le mode dynamique qu'ils décrivent : mode latéral et mode longitudinal.

Parmi les indicateurs du mode latéral on trouve le TLC (Time to Lane Crossing) qui représente le temps nécessaire, étant donné la vitesse du véhicule, pour franchir un des bords de la voie. C'est un indicateur mesurant le risque de sortie de voie, il est utilisé par le conducteur comme un paramètre de régulation des risques de sortie de voie et a déjà été considéré comme paramètre d'entrée pour la commande des systèmes d'assistance à la conduite [19]. Cet indicateur combine à la fois la dynamique du véhicule, la localisation sur la voie et la géométrie de la route. L'inconvénient du TLC est le calcul en temps réel qui n'est pas facile à cause de plusieurs limitations telles que l'existence des variables d'état du véhicule, la difficulté de prédire la trajectoire du véhicule, la nécessité d'avoir des informations sur la géométrie de la voie, ainsi que le temps de calcul.

Pour éviter ces inconvénients, nous calculons tout d'abord le DLC (Distance to Lane Crossing) qui est la distance nécessaire pour franchir un des bords de la voie. Le DLC peut être calculé en traçant la trajectoire estimée du véhicule sur une image traitée par des capteurs de vision. On pourra par la suite calculer le TLC en divisant le DLC par la vitesse du véhicule.

Concernant les indicateurs pour le mode longitudinal, on peut en identifier plusieurs qui entrent en jeu en mode suivi de véhicule. Dans ce cas, le conducteur gère simultanément la vitesse du véhicule et la distance intervéhiculaire. Ces indicateurs sont :

- l'interdistance qui doit être supérieure à une valeur minimale dite interdistance de sécurité,
- le temps intervéhiculaire obtenu en divisant l'interdistance par la vitesse du véhicule. Un temps intervéhiculaire minimal de 2 secondes est imposé sur les voies rapides par la législation depuis janvier 2003,
- la vitesse relative,

-
- le temps à collision TTC (Time To Collision) obtenu en divisant l'interdistance par la vitesse relative. Le TTC peut être utilisé pour des applications de contrôle longitudinal comme l'ACC [20] ou l'arrêt sur obstacle [21].

4.2.2. Les systèmes d'alerte

Les systèmes d'alerte ont été élaborés pour prévenir le conducteur d'une situation à risque, dans un temps suffisant pour qu'il puisse étudier la situation et choisir la bonne manœuvre à faire, et éviter le risque. Certains de ces systèmes ont déjà été introduits sur le marché et d'autres sont au stade de la recherche ou en cours de validation.

Le LDWS pour système d'alerte de sortie de voie, est l'un des systèmes déjà embarqués dans des véhicules. Ce système a pour rôle de surveiller la position du véhicule sur la voie de la route et avertir le conducteur si le véhicule dévie ou est sur le point de dévier en dehors de la voie.

Les LDWS actuellement disponibles sont des systèmes basés sur la vision. Ils emploient des algorithmes pour interpréter les images visuelles pour estimer l'état de véhicule (position latérale, vitesse latérale, titre, etc.) et l'alignement de la chaussée (largeur de la voie, courbure de route, etc.). Les LDWS avertissent le conducteur d'un départ de la voie quand le véhicule roule au-dessus d'un certain seuil de vitesse et le signal du retournement du véhicule n'est pas en service. En outre, ils informent le conducteur quand les inscriptions de la voie sont insatisfaisantes pour la détection, ou si le système fonctionne mal. Ils ne prennent aucune mesure automatique pour éviter un départ de la voie ou pour commander le véhicule ; donc, les conducteurs restent responsables de l'exploitation sûre de leurs véhicules [4].

Concernant les accidents en virages, il est très important de prévenir le conducteur du prochain virage et l'aider à optimiser la vitesse de son véhicule à l'entrée du virage. C'est le cas des systèmes d'alerte en approche de virage ou Curve Warning System (CWS). Leur principe repose sur l'émission d'une alerte lorsque qu'un véhicule approche un virage à une vitesse trop élevée pour le passer en sécurité. La méthode consiste à utiliser une carte digitale combinée avec un GPS permettant de positionner le véhicule en temps réel. Parmi les CWS existants, le système de Daimler-Chrysler [2] définit la vitesse limite pour une route en fonction de sa courbure.

Les problèmes liés à un tel système sont multiples. Il faut, en effet, pouvoir détecter l'approche du virage, en connaître les caractéristiques, calculer une vitesse critique et, le cas échéant, émettre une alerte ou corriger la vitesse. Ces systèmes sont encore peu développés compte tenu des problèmes de connaissance de l'infrastructure. Néanmoins, la NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration, a édité une suite de recommandations minimales dans son rapport [16] pour ce type de système. Elle porte sur le mode de calcul de la vitesse limite dans le virage, en fonction du rayon de courbure minimal, du devers dans le virage et de l'adhérence maximale mobilisée, ainsi que sur la vitesse d'approche en fonction de la décélération maximale voulue.

Daimler-Benz propose une version sommaire d'un SAV (Système d'Alerte en Virage) utilisant les cartographies embarquées courantes et une localisation par GPS [2]. Etant donnée la précision des cartes actuelles, la modélisation de l'infrastructure reste sommaire, ainsi que celle du véhicule. Le système reste peu détaillé. Renault [22], propose un SAV utilisant les nouvelles bases de données développées dans le cadre du projet NextMap. La description de l'infrastructure est plus détaillée, néanmoins les modèles utilisés restent simplistes et l'alerte générée n'est que fonction de la courbure et du devers dans le virage.

4.2.3. Les systèmes actifs

Le premier système ADAS qui a été embarqué sur les véhicules aux Etats-Unis avant l'année 1990 et en Europe, est le Cruise Control (CC) ou le régulateur de vitesse. C'est un instrument électronique permettant de commander la vitesse d'un véhicule. Il est particulièrement utile pour respecter les limitations de vitesse sur les longs trajets. Le système enregistre et maintient la vitesse choisie par le conducteur. Celui-ci peut toujours augmenter ou diminuer sa vitesse momentanée manuellement selon une valeur définie puis revenir, s'il le souhaite, à la dernière vitesse mémorisée. L'actionnement de la touche de commande d'arrêt, de la pédale de frein ou de la pédale d'embrayage a pour effet de désactiver le régulateur de vitesse. Quand le trafic est dense ou si les circonstances ne sont pas favorables (chaussée glissante, humidité, etc.), il convient de ne pas utiliser le régulateur de vitesse qui ne prend pas en considération ces situations.

En 2000, une amélioration a été introduite à ce système en adjoignant au régulateur de vitesse un capteur extéroceptif tel un Radio Detection And Ranging (RADAR), Light Detection And Ranging (LIDAR), etc. Le système peut alors adapter sa vitesse en fonction d'une part de la consigne du conducteur et, d'autre part, des véhicules à l'avant. Ce système est appelé Adaptive Cruise Control. Il permet de détecter et évaluer le trafic, il mesure aussi la distance avec le véhicule devant et adapte la vitesse du propre véhicule tout en contrôlant les freins, le moteur et la boîte de vitesse.

L'ACC est un système confortable qui peut être utilisé en conjoint avec d'autres ADAS tels que les CAS (Collision Avoidance System), DC (Distance Control),... Il se caractérise par le fait qu'il maintient une distance de sécurité entre les véhicules sans l'intervention du conducteur. Des problèmes persistent, néanmoins, au niveau des capteurs utilisés. En effet, si un RADAR ou un télémètre Laser permet de détecter les obstacles à l'avant du véhicule avec une grande précision, ils sont incapables de les localiser par rapport à la route. A l'inverse, un système utilisant des caméras permet d'obtenir une information plus riche, mais celle-ci sera moins précise. Les constructeurs travaillant sur ce sujet contraignent fortement leur système en prenant des vitesses minimales de fonctionnement. En fixant une vitesse minimale élevée, ils s'assurent que le véhicule roule sur une autoroute, où les rayons de courbure sont élevés. Ainsi, les objets détectés par les RADARs le seront dans la voie de circulation. Un capteur ROA (Received signal strength Of Arrival) plus intelligent est utilisé dans le système ACC pour pallier ces limitations. Ce capteur permet de détecter plusieurs véhicules sur la route, même dans les virages serrés, les entrées et les sorties d'autoroute : il est insensible au brouillard, à la pluie et à la neige [1].

Une version plus avancée du système ACC consiste à considérer les vitesses plus faibles dans les phases d'arrêt et de redémarrage du véhicule ainsi que pour la conduite sur les routes urbaines. Ce système appelé Low Speed Following System (LSFS) a été embarqué sur les véhicules au Japon vers l'année 2004. Des recherches se déroulent actuellement sur un système plus vaste, qui prend en compte toutes les vitesses possibles, c'est le Full Speed Range ACC (FSRA).

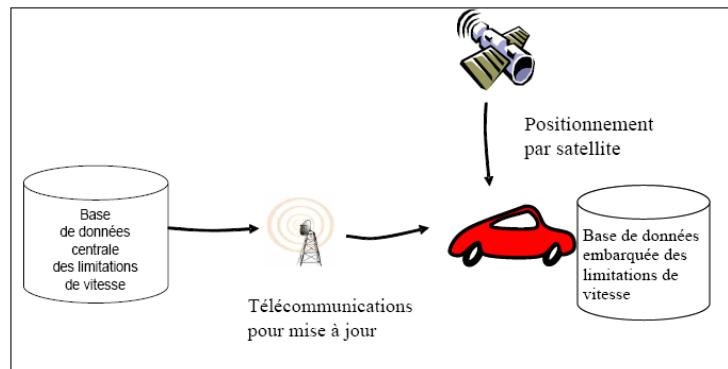
Une version plus avancée du LDWS a été introduit au Japon en 2004, c'est le LKA (Lane Keeping Assistance). Cette assistance détecte toute possibilité de sortie de voie et agit sur la dynamique du véhicule pour le conserver dans la voie automatiquement [23].

4.2.4. Nouvelle technologie d'assistance à la vitesse et de contrôle du véhicule

Les nouvelles recherches dans ce domaine sont essentiellement conduites dans le cadre des systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse (ISA, Intelligent Speed Adaptation). Placé dans les

véhicules, l'ISA est un système qui influence le choix de la vitesse du chauffeur ou du véhicule. Du point de vue technique, l'ISA fonctionne comme suit (Fig. 2.12):

- Un GPS ou Global Positioning System détermine avec précision la position du véhicule via le signal d'une liaison satellite permanente.
- Une carte digitale indique les régimes de vitesse en vigueur.
- Les données sur la position et la vitesse de la voiture sont comparées en permanence avec les régimes de vitesse en vigueur.
- Cette information est envoyée au conducteur et/ou à la voiture.



Source : La gestion de la vitesse [11]

Fig. 2.12 : Système de communication du ISA

Un système ISA peut influencer la vitesse de différentes manières :

- L'ISA avertit le conducteur qu'il roule trop vite : Un signal (visuel ou sonore) avertit le conducteur qui roule trop vite. Le conducteur peut alors décider lui-même d'adapter sa vitesse. Il s'agit de la variante ouverte d'ISA.
- L'ISA exerce une contre-pression en cas de vitesse excessive : Si le véhicule atteint la vitesse maximale pour la zone, l'ISA exerce une contre-pression sur l'accélérateur. Les personnes qui roulent trop vite reçoivent ainsi un signal clair et ont des difficultés à enfoncer l'accélérateur. Si le conducteur décide de continuer à rouler plus vite que la vitesse autorisée, il doit vaincre cette résistance de l'accélérateur. La surpression sur la pédale est maintenue de sorte que l'on sache en permanence que l'on roule trop vite. Il s'agit de la variante semi-ouverte de l'ISA, aussi appelée l'accélérateur actif.
- L'ISA rend impossible l'excès de vitesse : L'ISA limite directement la vitesse de la voiture de sorte que l'on ne peut excéder la limite de vitesse applicable dans cette zone. On ne peut alors rouler plus vite que si l'on déconnecte le système ISA. Il s'agit de la variante fermée d'ISA.

Plusieurs projets de recherche et de développement ont été lancés dans le cadre des systèmes ISA dans plusieurs pays de l'union européenne pour améliorer les technologies d'assistance à la vitesse et de contrôle du véhicule. Des essais ont été déjà faits sur plusieurs véhicules dans des différents domaines. On présente alors certains de ces projets, plus particulièrement ceux auxquels ont participé des entreprises et des laboratoires français : Projet LAVIA, Projet SASPENCE/PREVENT, Projet ARCOS,... ainsi que d'autres projets tels que SpeedAlert, PROSPER, etc.

5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique sur la sécurité routière : les accidents (causes, effets, mécanismes et facteurs aggravants), la lutte contre l'insécurité routière (les précautions prises par l'Etat et les systèmes d'assistance à la conduite). Dans cette étude, nous avons pu remarquer que les accidents routiers sont de en diminution suite au développement dans la construction automobile et les actions de l'Etat. Toutefois cette diminution du nombre d'accidents n'est pas encore suffisante, il est nécessaire de continuer la recherche dans ce domaine pour aboutir à des systèmes d'assistance à la conduite assurant une conduite plus sécurisée et évitant les situations critiques.

L'étude des mécanismes d'accidents, ainsi que les statistiques présentées dans ce chapitre, montrent le problème majeur de la vitesse au niveau de la sécurité routière. La sortie de route étant la conséquence principale de la vitesse excessive, il est alors très efficace d'éviter ce type d'accident en éliminant sa cause principale : l'excès de vitesse. D'où l'objectif principal de la thèse qui est d'étudier le risque de sortie de route du véhicule et de proposer une assistance à la conduite. Cela se traduit par le développement d'un système d'alerte à des vitesses excessives prenant en compte tous les paramètres de la conduite : caractéristiques dynamique du véhicule, caractéristiques de l'environnement et de l'infrastructure, ainsi que le comportement du conducteur.

La détermination de ces caractéristiques n'est pas simple. Certaines doivent être mesurées par des capteurs spécifiques, les autres qui ne sont pas mesurables ou mesurables par des capteurs onéreux, seront déterminées par différentes méthodes de calcul. Par exemple, nous pouvons mesurer les caractéristiques de l'infrastructure (pente, devers, courbure, accotement, etc.), de l'environnement (distance de visibilité, etc.) et du véhicule (vitesse, accélération, etc.). Par contre, d'autres paramètres qui sont aussi importants pour déterminer la stabilité du véhicule et pouvant être graves avec des vitesses excessives ne sont pas facilement mesurés tel que : l'angle de dérive du véhicule. D'où la nécessité des méthodes de calcul spécifiques : les estimations.

L'objectif principal du chapitre suivant consiste alors à présenter les différents capteurs et méthodes de calcul qui peuvent être utilisés pour achever notre travail. Ce chapitre sera divisé en deux parties : les capteurs et les observateurs.

CHAPITRE 3 : ARCHITECTURE DU SYSTÈME D'ALERTE ET MÉTHODES DE CALCUL

1. Introduction

L'objectif de la thèse est de développer un nouveau système modulaire d'alerte pour des vitesses excessives. nous désignons par système modulaire, une architecture de base pouvant être considérée comme un patron qui peut être modifié et amélioré pour prendre en compte d'autres éléments influant le résultat du fonctionnement du système.

La comparaison entre les différents systèmes d'alerte à des vitesses excessives présentés dans le premier chapitre nous permet de valoriser ces différentes méthodes. Les systèmes nationaux de limitation de la vitesse sont limités à des considérations prises par l'état en se basant sur des statistiques permettant de définir la vitesse maximale pour une portion de route selon la géométrie de l'infrastructure. Cependant, ces systèmes négligent d'autres paramètres aussi importants et influents sur la détermination de la vitesse maximale, par exemple les caractéristiques de l'environnement (une visibilité dégradée pour cause de brouillard, l'état de la chaussée qui peut être sèche ou mouillée, peut influencer sur l'adhérence disponible,...), le conducteur, ainsi que la dynamique du véhicule.

Nous distinguons deux approches de calcul de la vitesse maximale à bord du véhicule en fonction de toutes les caractéristiques de la conduite : une approche statistique et une approche mathématique. La première consiste à mesurer sur un site la vitesse de passage des véhicules conduits par différents conducteurs et de classer cette vitesse en fonction des conditions externes (infrastructure, environnement, conducteur). Cette approche permettra ensuite de construire une base de données qui peut être intégrée dans les véhicules comme un système comparant la vitesse du véhicule actuelle et la vitesse de passage préenregistrée sous des conditions similaires. Cependant, cette méthode nécessite d'avoir les possibilités correspondantes : site de test, différents types de véhicules, un grand nombre de capteurs pour mesurer les grandeurs nécessaires, un échantillon de différents types de conducteurs. Cette approche a été présentée par J. Lu [109] qui développe un profil de vitesse maximale fondée sur l'ajustement de la vitesse V_{85} par des facteurs d'ajustement déterminés à l'aide d'études statistiques routières.

Ces moyens n'étant pas à notre disposition, nous préférons donc nous baser sur la deuxième approche qui consiste à déterminer la vitesse limite en utilisant des modèles mathématiques à la place des mesures statistiques tout en utilisant l'approche de calcul de la vitesse limite présentée par [109]. Ces modèles serviront alors de définir le lien entre la vitesse du véhicule et les différentes grandeurs influentes.

Les systèmes d'alerte à des vitesses excessives actuelles présentent certains inconvénients liés aux méthodes de calcul de la vitesse utilisée, dont on peut citer :

- La géométrie de la route n'est pas complètement considérée, il reste d'autres paramètres à introduire dans les équations, tels que : l'accotement, la distance de visibilité à travers une pente et une courbure,...
- L'état de l'environnement n'est jamais considéré. La distance de visibilité atmosphérique est l'un des facteurs les plus influents sur la détermination de la vitesse maximale.
- Ces méthodes considèrent les paramètres géométriques du véhicule et non pas l'état dynamique qui change tout au long du trajet de conduite. L'état dynamique du véhicule peut influencer certains paramètres qui peuvent créer des situations critiques lors des vitesses excessives (l'angle de dérive du véhicule). Il faut donc penser à étudier l'impact de ces paramètres sur la vitesse et donc de calculer la vitesse maximale en fonction de ces paramètres.
- L'utilisation de ces méthodes est limitée. Il est difficile de les développer et les améliorer pour prendre en compte d'autres caractéristiques importantes pour la détermination de la vitesse maximale du véhicule.

Pour cela, nous avons besoin d'un système de calcul de la vitesse maximale fondé sur une architecture modulaire permettant, dans un premier temps, de prendre en considération les paramètres disponibles influents sur la vitesse, et d'intégrer, dans un second temps, toutes les caractéristiques pouvant être utiles pour la détermination de cette vitesse. L'architecture générale du système développé en se basant sur notre approche est principalement représentée dans ce chapitre ainsi que les différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour aboutir à notre objectif.

2. Architecture générale du système développé

L'objectif principal de notre système est de tracer un profil de vitesse maximale en fonction des différentes sources de mesures des caractéristiques de l'infrastructure, de l'environnement, du véhicule, et du conducteur ainsi qu'une valeur de vitesse de référence bien déterminée. La figure (Fig. 3.1) représente le principe de notre approche qui consiste à définir les mesures disponibles et le calcul d'une vitesse de référence qui sera ajustée par les mesures pour obtenir la vitesse de référence ajustée. L'ajustement de la vitesse de référence est établi par un modèle mathématique. Ce modèle sera développé par la suite dans le chapitre 6. Enfin, notre profil de vitesse maximale sera défini comme étant le minimum entre la vitesse de référence ajustée et la légalisation imposée par l'état.

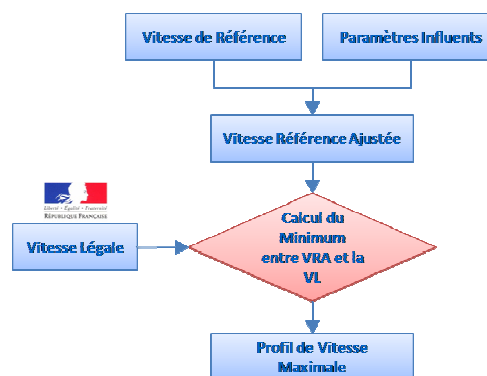


Fig. 3.1 : Architecture générale du système d'alerte

Le système d'alerte sera développé en deux étapes principales : la première consiste à faire le calcul nécessaire pour le fonctionnement en temps réel du système (Offline). La deuxième étape sera donc le fonctionnement en temps réel sur le véhicule (Online). Les figures (Fig. 3.2) et (Fig. 3.3) représentent les deux étapes décrites ci-dessus.

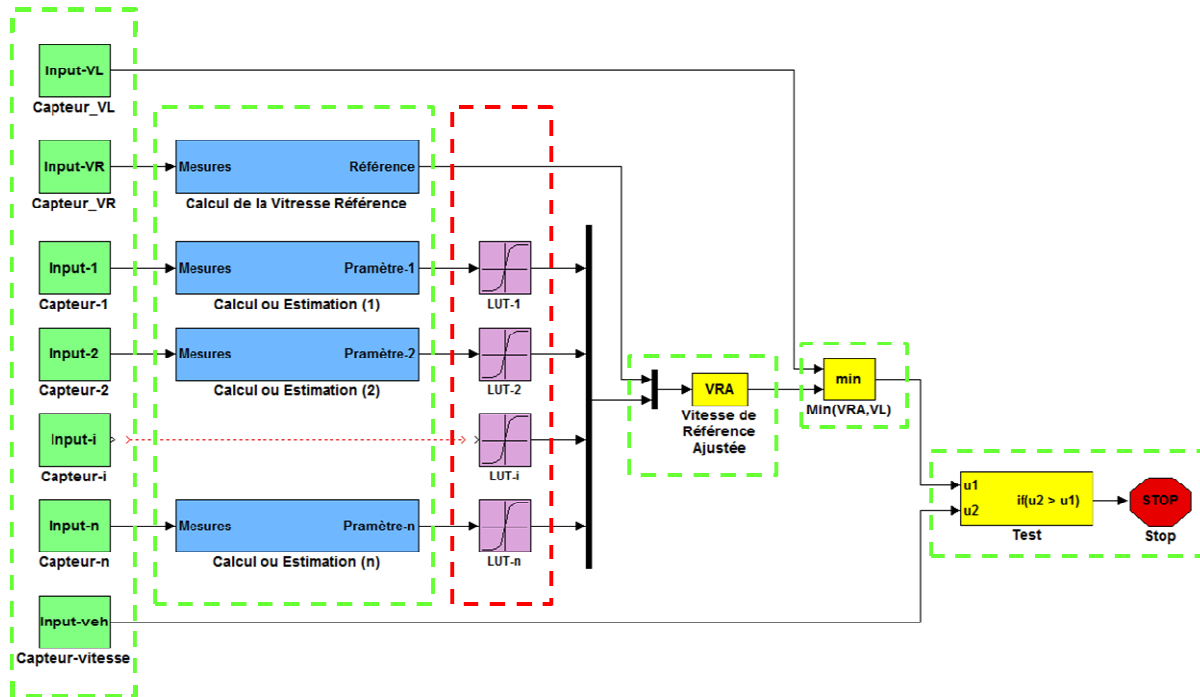


Fig. 3.2 : Architecture du fonctionnement en temps réel du système d'alerte

La conception de ce système comporte six parties principales : la mesure par des capteurs embarqués, les méthodes de détermination des différents paramètres, le développement des LUT (Look-Up Table), le calcul de la vitesse de référence ajustée, la détermination du profil de la vitesse maximale et la génération d'alerte. Nous notons que tous ses parties se font en temps réel sur le véhicule sauf le développement des LUT qui consiste la première étape du système. Le fonctionnement global sera donc sous la forme ci-dessous :

- Un ensemble de capteurs (ABS, Cameras, Centrale inertielle, ...) embarqués sur le véhicule permettent de mesurer les grandeurs nécessaires.
- La deuxième partie du système consiste à traiter les mesures :
Une synchronisation est nécessaire pour pouvoir utiliser les mesures des différents capteurs pour effectuer une tâche principale.
Certaines mesures sont tout de suite utilisées pour déterminer les grandeurs de la vitesse légale et la vitesse actuelle du véhicule. D'autres sont introduits dans des algorithmes de calcul pour déterminer le profil d'une vitesse de référence, traiter ces mesures pour déterminer leur impact sur la vitesse maximale, et ensuite la génération des LUT qui permettent de donner des facteurs d'ajustement de la vitesse maximale.
- La troisième partie consiste à développer les LUT : ce sont des tables de correspondances qui permettent de simplifier le calcul en temps réel et de définir des facteurs d'ajustement pour la valeur mesurée ou estimée des chaque paramètre.

Nous avons démontré dans le premier chapitre que parmi les accidents routiers, la sortie de route est la plus fréquente pour les véhicules légers. Pour cela, nous nous intéressons à l'indicateur principal de la sortie de route : l'angle de dérive α .

3.1.2. Paramètres de l'infrastructure

La liaison entre le véhicule et l'infrastructure entraîne des contraintes sur la vitesse du véhicule selon les différentes caractéristiques de l'infrastructure telles que la pente, le devers, la courbure, la largeur de l'accotement, l'adhérence disponible, la visibilité géométrique, etc. Toutes ces caractéristiques ont une influence sur la détermination de la vitesse. Par exemple, une chaussée avec une adhérence faible (chaussée mouillée) nécessite une diminution de la vitesse que sur une chaussée d'adhérence forte (chaussée sèche). Il est donc important d'étudier ces paramètres pour pouvoir déterminer la vitesse limite du véhicule.

3.1.3. Paramètres de l'environnement

Le véhicule roule dans un environnement très variable et instable (vent, brouillard, pluie, etc.). Cela doit être pris en considération lors du calcul de la vitesse limite qui doit être définie en fonction des différentes conditions de conduite. Ces caractéristiques de l'environnement ou de l'atmosphère peuvent être représentées par deux paramètres essentiels : la visibilité atmosphérique, le vent et l'état de la chaussée.

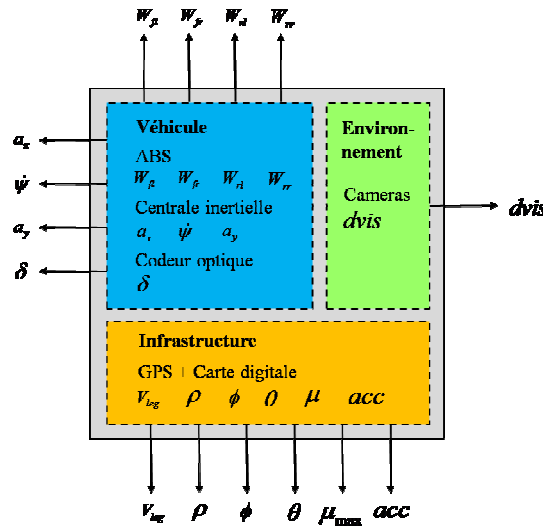


Fig. 3.5 : Capteurs et paramètres du véhicule, de l'environnement et de l'infrastructure

3.1.4. Mesures nécessaires

Les caractéristiques du véhicule sont mesurées par trois capteurs : l'ABS mesure les quatre vitesses de rotation de chacun des quatre roues, une centrale inertielle est dédiée pour la mesure des accélérations longitudinale et latérale ainsi que la vitesse de lacet, et enfin, un codeur optique est nécessaire pour déterminer l'angle de braquage défini par le conducteur. Ces mesures permettront l'estimation de l'angle de dérive.

La visibilité atmosphérique peut être mesurée par une caméra et un diffusomètre. Le vent (vitesse et direction) est mesuré par un anémomètre.

Pour déterminer les caractéristiques de l'infrastructure, nous disposons de deux capteurs : un GPS et une carte digitale. Ces capteurs permettent de déterminer les différentes caractéristiques de la géométrie de la route : la courbure, l'angle de devers, la pente, l'adhérence disponible selon le type de la chaussée, l'accotement de la route, et la vitesse légale pratiquée sur la route. Le GPS sert à localiser le véhicule sur la route et ensuite la carte digitale permet de donner les différents variables selon le type de la route où le véhicule a été localisé. On aura donc une mise à jour en temps réel à chaque instant des mesures.

3.2. Développement théorique

3.2.1. Vitesse de référence

Le choix de la vitesse de référence est basé sur l'étude comparative faite au premier chapitre entre les différentes méthodes de calcul de la vitesse limite. Nous choisissons alors la vitesse calculée par la SAVV (Système d'Alerte de Vitesse excessive en Virage). C'est un système permettant de calculer la vitesse maximale du véhicule à l'approche d'un virage. Les équations mathématiques de ce système ont été développées en se basant sur une modélisation du véhicule, de l'interface pneumatiques chaussée et du conducteur en fonction de sa mobilisation d'adhérence tout en considérant certains facteurs influant la vitesse tels que la pente, le devers. Les mesures nécessaires pour utiliser les équations de la SAVV sont : la pente de la route, l'angle de dévers, la courbure et l'adhérence maximale disponible.

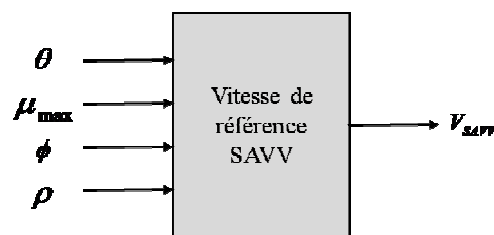


Fig. 3.6 : Mesures du système SAVV

3.2.2. Traitement des données

Le traitement des données est essentiellement développé en deux étapes : l'estimation des variables non mesurables (l'angle de dérive) et ensuite l'étude de la variation de la vitesse en fonction de la variation de ces variables ainsi que d'autres variables déjà mesurées par les capteurs spécifiques. Les variables à mesurer ou à calculer seront ensuite définies par une étude de sensibilité pour choisir les variables les plus influentes sur la vitesse.

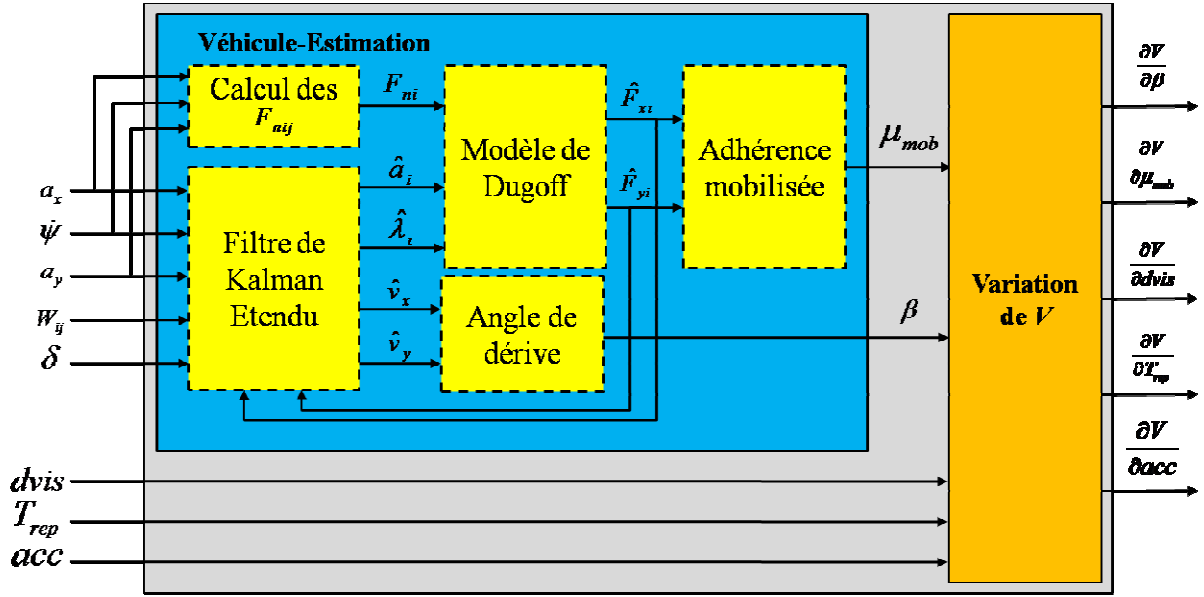


Fig. 3.7 : Algorithme de prise en considération des différents paramètres

Après avoir choisi les différents paramètres à étudier, nous passons à l'étude de la variation de la vitesse en fonction de la variation de ces paramètres. Dans ce cas, nous pouvons tracer, pour chaque paramètre, un graphe représentant le taux de variation de la vitesse en fonction de la variation au niveau du paramètre en se basant sur des équations mathématiques bien définies. Ces graphes serviront par la suite pour créer une LUT (Look-Up Table).

3.2.3. Conception des LUT

Une LUT, est un terme informatique désignant une table de correspondance, qui permet d'associer des valeurs selon certains paramètres. Elle se comporte comme une table de vérité, et fournit sa sortie en fonction de ses entrées et du contenu de la table. Une LUT est donc une structure de données, employées pour remplacer un calcul par opération. Le gain de vitesse peut être significatif, car rechercher une valeur en mémoire est souvent plus rapide qu'effectuer un calcul important.

Il est donc plus pratique de créer une LUT qui, en se basant sur l'étude de l'influence de la variation des différents paramètres sur la variation de la vitesse maximale, permet de synthétiser un facteur d'ajustement correspondant à chaque paramètre étudié : dans la LUT, la valeur de chaque paramètre correspond à une valeur du facteur d'ajustement. Ces facteurs seront par la suite multipliés par la vitesse de référence pour déterminer la vitesse maximale du véhicule.

Le facteur d'ajustement est compris entre 0 et 1, il permet d'adapter la valeur de la vitesse maximale en fonction de la grandeur du paramètre correspondant. Un facteur d'ajustement égal à 0 correspond à un risque majeur, cela signifie que la situation est trop critique, il faut stopper immédiatement le véhicule, la vitesse sera donc égale à 0. Un facteur d'ajustement égal à 1 correspond à un risque mineur, cela signifie que le paramètre étudié à cet instant, n'a d'impact sur la vitesse maximale. Dans le cas où tous les facteurs d'ajustement sont égaux à 1, la vitesse maximale sera égale au minimum entre la vitesse de référence et la vitesse légale.

3.3. Profil de vitesse maximale

Les facteurs d'ajustement déterminés par l'étape précédente du système d'alerte sont comparés mutuellement pour choisir le minimum qui sera par la suite multiplié par la vitesse de référence. La vitesse de référence ajustée sera finalement comparée aux limitations nationales pour définir le profil de la vitesse limite.

$$V_{Réf,Aj} = V_{Réf} \times \min(f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$V_{limite} = \min(V_{Réf,Aj}, V_{légale}) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

3.4. Génération d'alerte

Le profil de la vitesse limite déterminée à chaque instant en temps réel de conduite servira pour définir la vitesse limite à l'avance. Cette vitesse sera comparée à la vitesse pratiquée par le conducteur. Dans le cas d'une vitesse supérieure à la limite, une génération d'alerte sera lancée pour informer le conducteur de sa vitesse supérieure à la limite.

4. Evaluation du système

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté une nouvelle approche des systèmes de calcul de la vitesse maximale. Cette approche consiste à calculer la vitesse maximale par des équations mathématiques et ensuite de la multiplier par des facteurs d'ajustement correspondants aux différents paramètres étudiés précédemment.

Le système a été développé en se basant sur les différentes méthodes de calcul de la vitesse : Il comporte les systèmes nationaux qui déterminent la vitesse légale permise par l'état, les modèles mathématiques de calcul de la vitesse et l'approche des modèles réels qui permet de prendre en compte tous les paramètres influents sur la limitation de la vitesse. En étudiant l'objectif de ce système et son mode de fonctionnement, nous pouvons aboutir à certaines conclusions permettant de définir des avantages et des inconvénients liés à ce système.

Parmi les avantages nous citons :

- Le premier avantage se traduit par le fait que le système est basé sur les différentes méthodes de calcul de la vitesse maximale (systèmes nationaux, modèles mathématiques et modèles réels), cela signifie que le système prend en compte les réglementations de l'état, la dynamique du véhicule, ainsi que les caractéristiques de l'infrastructure et de l'environnement.
- C'est un système modulaire. Il est donc possible de faire des modifications pour améliorer son fonctionnement et ajouter d'autres paramètres ayant un impact sur la détermination de la vitesse maximale pour les prendre en considération.
- Le système peut être implanté facilement sur les véhicules standards et peut être utilisé par tous les conducteurs.
- On a toujours la possibilité de faire évoluer le système pour passer d'un système d'alerte à des vitesses excessives à un système de contrôle du véhicule pour diminuer sa vitesse d'avancement dans le cas d'une vitesse supérieure à la vitesse calculée. Il servira donc d'un indicateur de commande d'un autre système de contrôle agissant sur le système de freinage ou de la boîte de vitesse du véhicule.

- Le système ne nécessite pas de station de diffusion de données implantées sur les routes, comme l'exigent les autres systèmes d'assistance de limitation de la vitesse excessive, hormis pour la distance de visibilité atmosphérique
- Le fonctionnement du système est isolé de toute autre information provenant des autres véhicules circulant autour du véhicule assisté. Cela peut être considéré comme un inconvénient, mais l'architecture modulaire du système permet d'avoir la possibilité d'améliorer ce système et d'ajouter les informations nécessaires provenant des autres véhicules et influents sur la vitesse maximale, sur la conception de la LUT comme étant des facteurs ajustable au calcul de la vitesse limite.

Parmi les inconvénients :

- L'architecture du système proposé nous montre que ce système nécessite un certain nombre de capteurs pour qu'il puisse fonctionner. Ces capteurs sont majoritairement embarqués sur des véhicules standards, sauf la centrale inertielle qui est onéreuse. Le système ouvre donc un champ de recherche pour trouver un ou des capteurs fictifs qui peuvent remplacer la centrale inertielle, et donc qui permettent d'estimer les paramètres mesurés par la centrale inertielle (c'est ce qui est fait pour l'estimation de l'angle de dérive du véhicule).
- La fonction de calcul de la vitesse maximale présente un inconvénient : c'est la façon d'introduire les facteurs dans cette fonction. Nous pouvons remarquer que la multiplication de la vitesse de référence par les facteurs ne prend pas en considération le taux d'influence de chaque facteur sur la vitesse par rapport aux autres facteurs d'ajustement. Il est donc important d'ajouter des poids (des puissances) correspondants à chaque facteur pour valoriser son influence sur la vitesse par rapport aux autres facteurs.
- La deuxième solution peut être de changer la façon de multiplier ces facteurs par la vitesse légale. Une autre approche consiste à multiplier chaque facteur, à part, par la vitesse légale pour obtenir une valeur de vitesse correspondant à ce facteur. Enfin, nous pouvons considérer que la vitesse maximale est la vitesse minimale parmi toutes les valeurs calculées pour chaque facteur. Cette approche évite que la valeur de la vitesse maximale tende vers zéro dans le cas de plusieurs situations critiques.

5. Méthodes de calcul

Afin d'aboutir à l'architecture proposée dans les paragraphes précédents, il nous faut des mesures et des valeurs de plusieurs paramètres qui ne sont pas toujours facilement mesurable. Pour cela, nous allons présenter dans le reste de ce chapitre les différents capteurs utilisés dans notre travail, ainsi que le principe de la méthode d'estimation aussi utilisée.

5.1. Capteurs utilisés dans notre étude

Le rôle général des capteurs est de transformer une grandeur physique ou chimique (souvent non électrique) en une grandeur électrique (parfois avec des niveaux intermédiaires non électriques).

En qualité d'organes périphériques, les capteurs utilisés sur les véhicules, établissent le lien entre le calculateur électronique - le plus souvent numérique - en tant qu'unité de traitement et le

véhicule avec ses fonctions de transmission, de freinage, de suspension et de carrosserie très complexes (sans oublier les fonctions de guidage et de navigation). Un circuit d'adaptation (chaîne de mesure, système de saisie de valeurs mesurées) se charge en général de donner aux signaux des capteurs la forme standardisée exigée par le calculateur électronique.

Il est également possible d'intégrer au processus les informations capteurs d'autres unités de traitement et de faire intervenir le conducteur par le biais d'organes de commande simples. Des visuels informent en continu le conducteur sur l'état de fonctionnement statique et dynamique du véhicule en tant que processus global.

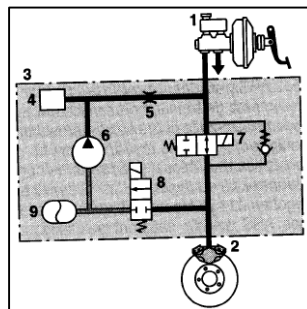
On s'intéresse dans ce paragraphe à présenter les différents capteurs utilisés sur le véhicule classés selon la nature de la grandeur mesurée.

5.1.1. Capteurs de la dynamique du véhicule

Parmi les capteurs de la dynamique du véhicule, on peut citer le capteur de vitesse inductif, le GPS, le Codeur Optique, le Correvit et la Centrale Inertielle. On s'intéresse à présenter ces capteurs qui seront ensuite utilisés dans notre étude. A noter que les véhicules de test du LIVIC sont équipés de ces capteurs.

Capteur de vitesse inductif

Le système antiblocage ou Anti-lock Braking System (ABS) est un système de stabilisation des véhicules. C'est un dispositif de régulation du système de freinage qui empêche le blocage des roues au freinage, tout en maintenant la stabilité directionnelle. Ce dispositif permet en règle générale de réduire les distances de freinage par rapport à un freinage avec blocage des roues et ce, tout particulièrement sur route mouillée. La réduction des distances de freinage peut atteindre 10 % selon l'humidité de la chaussée et les conditions d'adhérence des pneus.

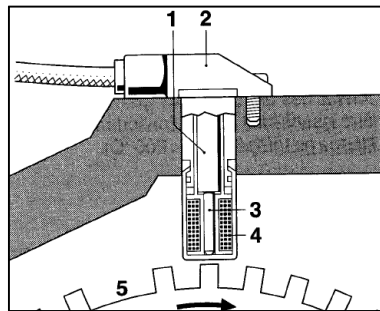


Source : Mémento de technologie automobile [27]

Fig. 3.8 : Principe de l'ABS (1-maître-cylindre, 2-cylindre de frein de roue, 3-groupe hydraulique, 4-amortisseur de pulsation, 5-limiteur de débit, 6-pompe de retour, 7-vanne d'admission, 8-vanne d'échappement, 9-accumulateur)

L'ABS est composé essentiellement de trois composants : un capteur de vitesse de rotation, un calculateur électronique et des électrovannes modulatrices de pression (Fig. 3.8). Le composant qui nous intéresse du système ABS, est le capteur de vitesse de roue. Ce capteur servira de mesurer les vitesses de rotation des quatre roues du véhicule. C'est un capteur inductif constitué d'un crayon aimanté à tige polaire en fer doux renfermant une bobine d'induction à deux connexions (Fig. 3.9). La rotation d'une couronne dentée ferromagnétique (ou autre rotor similaire) devant ce capteur induit dans l'enroulement une tension proportionnelle à la variation du flux magnétique. Si la denture de la

couronne est parfaitement régulière, la tension induite est sinusoïdale. La vitesse de rotation est déduite de l'espacement des passages à zéro de la tension.



Source : Mémento de technologie automobile [27]

Fig. 3.9 : Capteur de vitesse inductif (1-aimant permanent, 2-boîtier, 3-noyau en fer doux, 4-bobine, 5-disque denté avec repère de référence)

GPS

Le système de relocalisation par satellite ou Global Positioning System (GPS) est un système de détermination de la position par satellite. Ce système est constitué de 3 parties (Fig. 3.10) :

- Le segment spatial qui est l'ensemble des satellites, est composé de 21 satellites plus 3 de secours. En tout point non couvert de la terre, il y a toujours un minimum de cinq satellites visibles,
- Le segment de contrôle composé de l'ensemble des bases de contrôle qui suivent chaque seconde la trajectoire de chaque satellite. Ces bases sont réparties sur différents pays afin qu'au moins une station contrôle un satellite donnée. La station principale est située sur la Falcon Air Force Base dans le Colorado,
- Le segment utilisateur est le plus connu puisqu'il s'agit de l'ensemble des récepteurs GPS utilisés à travers le monde. Les variétés sont très importantes car il existe un GPS pour chaque type d'utilisation (randonnée en montagne, suivi d'itinéraire en mer...).



Fig. 3.10 : Satellites spatiales et récepteur GPS

Un GPS fournit traditionnellement, et au minimum, une position, une vitesse et un temps. La position est fournie soit en données angulaires (latitude / longitude), soit en données métriques suivant la grille UTM (Universal Traverse Mercator). Celle-ci est une projection permettant de mettre à plat la surface terrestre en la découpant en carrées de 1 km de côté. Le principe du positionnement GPS se base sur la mesure de distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues. On définit ainsi des sphères centrées sur des satellites et dont l'intersection donne la position

de l'utilisateur. Le récepteur GPS est capable d'identifier le satellite qu'il utilise à l'aide d'un signal pseudo-aléatoire émis par chaque satellite. Il obtient ainsi les informations sur l'orbite et la position du satellite. Pour mesurer la distance qui sépare le satellite du GPS, on mesure le temps mis par le signal pour aller de l'un vers l'autre.

L'inconvénient majeur du système GPS réside dans le fait que les satellites doivent être visibles par le récepteur, ce qui est fréquemment le cas en rase campagne, mais beaucoup plus rarement en zone urbaine. On parle dans ce cas de zone d'ombre satellitaire. Plusieurs sources d'erreurs peuvent être à l'origine des imprécisions obtenues par mesures GPS [28] :

- L'horloge interne du satellite. Bien qu'étant une horloge atomique, elle est tout de même source d'erreur,
- La dégradation volontaire (Selective Availability) : c'est la principale source d'erreur, elle permet à l'armée américaine de préserver un avantage de précision sur les civils. Cette dégradation artificielle des signaux émis par les satellites a été suspendue au 1er Mai 2000 mais peut être réactivée à tout moment,
- Les éphémérides : il faudrait prendre en compte le déplacement des satellites sur leur orbite, alors que les calculs théoriques partent du principe qu'il est fixe,
- La traversée atmosphérique : lorsque le signal traverse l'atmosphère, il ralentit, provoquant une erreur sur le calcul de distance,
- La réverbération : le signal ne parvient pas toujours directement jusqu'au récepteur, il peut être dévié par des obstacles, faussant ainsi les calculs (en montagne notamment),
- L'horloge du récepteur : peu précise.

Pour certaines applications particulières, la précision obtenue par le GPS traditionnel (de l'ordre de quelques mètres actuellement) n'est pas suffisante. Rapidement, le besoin d'une précision accrue s'est fait sentir, c'est ainsi qu'a été créé le GPS différentiel (Differential GPS ou DGPS en anglais). Une station fixe de position géographique connue effectue des relevés GPS simultanément avec la station mobile (Fig. 3.11). Se basant sur ses coordonnées réelles et celles établies par les informations des satellites, la station de référence détermine les corrections pour chaque satellite visible. Les stations mobile et fixe se trouvant géographiquement proches, elles utilisent les mêmes satellites et les corrections de la référence peuvent ainsi être appliquées sur la station mobile. Un positionnement centimétrique peut de cette manière être obtenu lorsque le GPS utilise la technique du « Real Time Kinematic » (RTK). Des détails sur les différents modes opératoires du système GPS ou de ses équivalents Européen (EGNOS) et Russe (GLONASS) pourront être trouvés dans [29], [30] et [31].

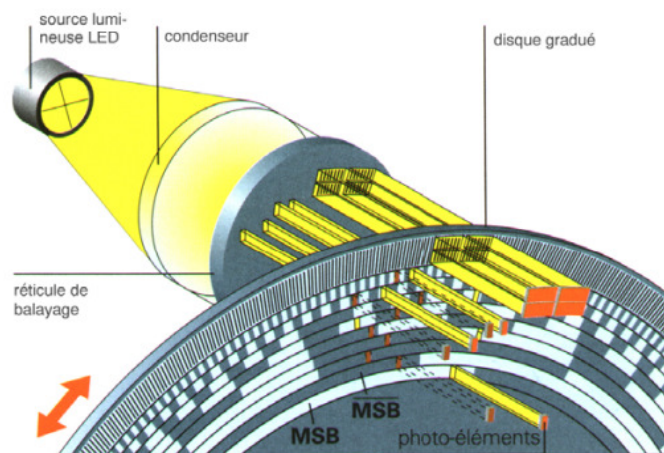


Fig. 3.11 : GPS différentiel

Codeur optique

Le fonctionnement des codeurs optiques est simple sur son principe mais extrêmement complexe au niveau de la réalisation. A partir d'une source lumineuse et un condenseur, de la lumière est envoyée au travers d'un réticule de balayage en direction d'un second réticule qui lui est mobile (disque ou règle). En fonction de la position relative des deux réticules, la lumière incidente sur des photo-éléments (photo-diodes ou photo-transistors) est traduite en signaux électriques (courants) dont les valeurs sont directement fonction de la position relative entre les réticules.

Un codeur optique rotatif est un capteur angulaire de position [32]. Lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui comporte une succession de zones opaques et transparentes (Fig. 3.12).



Source : Systèmes électromécaniques [32]

Fig. 3.12 : Codeur optique rotatif

La lumière émise par des diodes électroluminescentes arrive sur des photodiodes chaque fois qu'elle traverse les zones transparentes du disque. Les photodiodes génèrent alors un signal électrique qui est amplifié et converti en signal carré avant d'être transmis vers une unité de traitement.

Les codeurs absolus, sont formés de plusieurs pistes graduées selon un codage particulier afin d'éviter plusieurs transitions binaires simultanées. Le codeur est constitué d'une seule source lumineuse placée d'un côté du disque. La source lumineuse est suivie d'un ou plusieurs réticules de balayage par piste. Des photo-éléments, correspondant aux pistes graduées ou codées sont placés de l'autre côté du disque ou de la règle. Pour les pistes critiques, c'est à dire celle dont le pas de graduation est faible, deux photo-éléments sont utilisés afin de fournir des signaux équilibrés permettant une mesure différentielle.

Correvit



Spécifications

Intervalle de vitesse : 0.5 ... 400 kph
 Résolution de distance : 1.9 mm
 Déviation des mesures : $< \pm 0.1\%$
 Intervalle de l'angle : $\pm 40^\circ$
 Résolution de l'angle : $< \pm 0.1^\circ$
 Intervalle et distance de travail : 400 ± 100 mm

Fig. 3.13 : Correvit de Corrsys-Datron S-400

Le capteur de vitesses Correvit de Corrsys (Fig. 3.13) est un capteur optique, plus précisément un capteur d'images fonctionnant selon le principe de la corrélation optique. Il permet de mesurer la vitesse du véhicule sans contact. Une surface rugueuse, en l'occurrence la chaussée, est illuminée et l'image est projetée à travers un objectif sur une matrice de diodes. Une intercorrélation effectuée à partir de deux enregistrements successifs permet de déterminer la distance parcourue dans le sens longitudinal et transversal, ainsi que l'angle de dérive. Les mesures sont ensuite conditionnées pour obtenir les informations de vitesses longitudinale et transversale, sous forme analogique ou numérique.

Centrale inertielle

Une Centrale à Inertie ou Centrale Inertielle est un appareil de navigation de précision comportant des gyroscopes, des capteurs d'accélération et de vitesse angulaire et calculant en temps réel à partir de ces mesures l'évolution du vecteur vitesse et de la position du véhicule à bord duquel il est installé, ainsi que de son attitude (roulis, tangage, cap). Les centrales à inertie sont installées à bord de navires, d'aéronefs, de missiles et de véhicules spatiaux (Fig. 3.14).

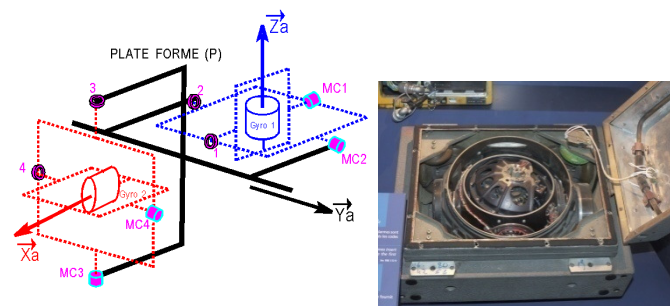


Fig. 3.14 : Centrale inertielle munie des gyroscopes

Le choix d'un accéléromètre peut être guidé par la considération d'un certain nombre de critères tels que la gamme d'accélération, les conditions d'environnement ou la précision. Il convient cependant de considérer le domaine d'application auquel le capteur est destiné. Dans le cadre de la dynamique véhicule, il s'agit de faire des mesures sur des mobiles dont les mouvements du centre de gravité restent à des fréquences faibles (quelques dizaines de Hz au maximum) et donnant lieu à des accélérations continues de faible niveau.

Le principal problème de l'accéléromètre lorsqu'il est utilisé pour la localisation est qu'il nécessite une double intégration pour obtenir la position du véhicule. Or, son signal de sortie est caractérisé par un bruit haut fréquence important. Dès lors, cette estimation se trouve souvent entachée d'une erreur considérable.

De nombreuses applications actuelles réclament des capteurs de vitesse angulaire compacts et surtout à prix bas. Dans ce contexte, les gyromètres piézoélectriques sont très largement employés. Ce type de capteur détermine la vitesse de rotation autour d'un axe généralement par l'effet de Coriolis. Celui-ci veut que tout déplacement linéaire d'un élément en rotation soumette cet élément à une force perpendiculaire au déplacement :

$$F = 2mv\Omega \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Où m désigne la masse de l'élément et v sa vitesse de déplacement.

5.1.2. Capteurs des conditions de l'infrastructure et l'environnement

Cartes électroniques

Les cartes électroniques routières consistent en une base de données numériques concernant les caractéristiques des routes (les caractéristiques géométriques, les légalisations de l'état...). Ces cartes numériques servent actuellement en combinaison avec le GPS à déterminer la position du véhicule en temps réel et d'informer le conducteur de sa vitesse actuelle et la vitesse maximale à chaque instant. Cependant, l'utilisation de ces cartes sera ensuite plus développée avec les systèmes de communication entre les véhicules, ainsi qu'entre le véhicule et l'infrastructure.

Caméra

La connaissance de l'environnement externe du véhicule tout au long de son trajet est nécessaire pour maintenir une dynamique du véhicule compatible avec les conditions externes. Cette connaissance est assurée par l'utilisation des capteurs cameras permettant de vision tous les caractéristiques du milieu extérieur. Il existe deux types de surveillance par camera : Le premier consiste en une caméra seule placé au niveau du rétroviseur intérieur, le second en un capteur stéréovision dont les caméras sont placées en haut du pare-brise avec un écartement maximal (compte-tenu de la géométrie du véhicule). Lorsqu'une seule caméra est utilisée, nous parlons de vision monocaméra. Lorsque deux caméras sont utilisées conjointement, c'est alors de la stéréovision.

Capteurs du vent

La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre (Fig. 3.15). Les anémomètres peuvent être divisés en deux classes :

- Ceux qui mesurent la vitesse
- Ceux qui mesurent la pression du vent

Cependant, il y a une relation étroite entre la vitesse et la pression. Ainsi, un appareil prévu pour une mesure fournira des informations sur les deux quantités. Le premier anémomètre a été inventé par Leone Battista Alberti au XVe siècle.

- Anémomètre à coupelles (dit de Robinson)
- Anémomètre à hélice
- Anémomètre à ultrason
- Anémomètre à plaque
- Anémomètre à tube
- Anémomètre à tube de Pitot
- Anémomètre à fil chaud



Spécifications

Vitesse de démarrage : 0.2 ms^{-1}
 Vitesse maximale : $> 75 \text{ ms}^{-1}$
 Précision : $< \pm 0.1 \text{ ms}^{-1}$
 Constante de distance : 2.3 m
 Durée de vie nominale : 25×10^9
 Operations minimum : > 20 ans

Fig. 3.15 : Anémomètre à trois coupelles (Anémomètre de Robinson)

D'autres types d'anémomètres sont les anémomètres à ultrasons ou à laser qui enregistrent les changements de phase du son ou de la lumière réfléchis par les molécules de l'air. Les anémomètres à fil chaud (ou thermiques) enregistrent la vitesse du vent en comparant chaque minute les écarts de température existant entre les fils chauds placés du côté du vent et ceux placés du côté sous le vent. Plus le vent est fort, plus le fil chaud sous le vent se refroidit.

L'avantage principal de l'emploi d'anémomètres non-mécaniques est une réduction de la sensibilité au gel. Pour la conversion de la direction du vent mesurée en une valeur électrique. La palette sous l'influence de la pression du vent se place dans la direction d'où il provient.

La visibilité

La mesure de la visibilité s'effectue à l'aide d'un visibilimètre. Il peut s'agir d'un diffusomètre (Fig. 3.16) ou d'un transmissomètre combine à un luminancemètre. Cet instrument de mesure se compose d'un émetteur et d'un récepteur et permet de déterminer la POM (Portée Optique Météorologique). Le Pouvoir Transmissif de l'atmosphère (PTA) caractérise le trouble atmosphérique. Il se définit par le rapport du flux lumineux reçu par le récepteur du transmissomètre et le flux lumineux émis.



Fig. 3.16 : Diffusomètre

Le coefficient d'extinction de l'atmosphère, noté k , est la proportion de flux lumineux qu'un faisceau de rayons lumineux parallèles émanant d'une source à incandescence à une température de couleur de 2700 K perd en parcourant dans l'atmosphère une longueur égale à l'unité de distance.

5.2. Filtres et observateurs

Un véhicule est un système très complexe rassemblant un grand nombre d'éléments mécaniques, électroniques et électromécaniques. Pour décrire tous les mouvements du véhicule, de nombreuses mesures et un modèle mathématique précis sont exigés. La dynamique du véhicule et les attributs de la route sont difficiles voire impossible à mesurer exactement même par des capteurs très onéreux. Par conséquent, il est nécessaire de développer des techniques d'évaluation telle que les « Estimateurs ».

On peut considérer que les bonnes valeurs des paramètres (ou des états) seront celles pour lesquelles les valeurs des mesures prédites par le modèle seront proches de celles obtenues à partir du système physique étudié.

Plus précisément, un estimateur ou reconstituteur d'état est un développement mathématique qui permet de reconstituer les états internes d'un système à partir uniquement des données accessibles, c'est à dire les entrées imposées et les sorties mesurées [33] (Fig. 3.17).

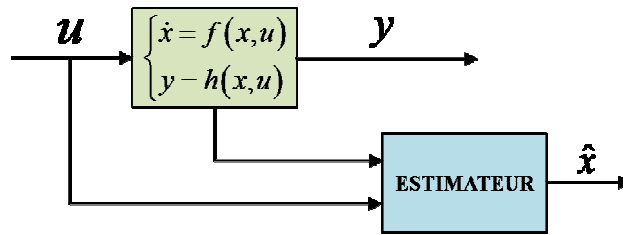


Fig. 3.17 : Composition du système Modèle-Estimateur pour l'estimation de l'état

Précisons qu'une condition nécessaire pour pouvoir mettre en œuvre un estimateur est que le système soit observable : l'observation des entrées et sorties du système, permet de déterminer son état dynamique.

5.2.1. État de l'art sur les différents types d'estimateurs

Les recherches sur les estimateurs (observateurs et filtres), peuvent être divisées en deux parties, la première présente la recherche sur les estimateurs pour les systèmes linéaires, et la deuxième est destinée sur la recherche d'un estimateur pour les systèmes non linéaires.

Pour les systèmes linéaires, le filtre de Kalman [34] permet de résoudre de façon optimale le problème du filtrage linéaire, quand les bruits du système sont additifs et gaussiens. Depuis 1960, le filtre de Kalman a été intensivement utilisé dans des applications diverses ainsi que dans le domaine de la sécurité routière pour l'estimation de l'état dynamique du véhicule [35], pour la prédiction de l'action du conducteur dans diverses situations [36], et a donné lieu à de nombreuses recherches. Une étude détaillée du filtrage linéaire par Kalman, est décrite dans [37], [38], [39]. Bertram et Basse (en 1961 et 1963, respectivement) semblent avoir été les premiers chercheurs pour développer les observateurs asymptotiques pour les systèmes linéaires; malheureusement leur travail n'a été jamais publié, mais est mis en référence par Kalman [40] et Astrom [41]. Plus tard, Luenberger [42] a développé essentiellement la même idée d'une manière différente, l'observateur de Luenberger n'est pas toujours suffisant, car l'erreur de l'estimation (de l'état ou de la sortie) engendrée par cet observateur pour un système incertain ou à entrées inconnues ne converge pas forcément vers la valeur nulle. Pour remédier à ce problème, un observateur stochastique de Luenberger est mis en œuvre par [43]. D'autre part, F. L. Lewis [44] a aussi introduit les observateurs des systèmes singuliers et J. Chen [45] a introduit les observateurs à entrées inconnues. Le problème de conception des observateurs à action proportionnelle et intégrale, pour des systèmes linéaires à entrées inconnues, a été également considéré [46], cet observateur est utilisé pour estimer la dynamique latérale du véhicule [47] et pour estimer le coefficient TLC (Time to Lane Crossing) permettant de déclencher une assistance pour éviter la sortie de route du véhicule [19]. Avant de finir, il est très important de passer un regard sur l'observateur à modes glissants, cet observateur est bien décrit par [48] et [49], cette étude consiste la construction de cet observateur pour les systèmes linéaires et non linéaires. L'observateur à modes glissants est caractérisé par son application sur les systèmes linéaires avec ou sans les entrées, sans oublier les systèmes linéaires avec des paramètres incertains. Que peut-on dire des systèmes non linéaires ?

En ce qui concerne les techniques d'évaluation non linéaires développées jusqu'à ce jour, le filtre de Kalman Etendue (EKF) est l'un des observateurs le plus largement diffusé entre des autres non linéaires basés sur les techniques de linéarisation [50], [51], un filtre de Kalman Etendue est utilisé pour l'estimation de la vitesse du véhicule et des forces des roues dans [52], [53]. En se basant sur un modèle non linéaire de frottement roue-sol, un filtre de Kalman est mis en œuvre pour estimer

le coefficient d'adhérence et l'angle d'inclinaison de la route dans [54], ainsi que pour estimer la rigidité latérale.

Une autre approche d'évaluation inclut les observateurs à modes glissants [55], [56]. Le procédé de conception consiste en déterminant un gain de commutation. Un aspect restrictif est que les sorties doivent se trouver sur les surfaces de glissement indiquées pour réaliser l'évaluation. Cet observateur est déjà utilisé pour l'estimation de l'angle de glissement du véhicule [57], pour l'estimation de l'état dynamique du système de commande de direction du véhicule [58], ainsi que pour l'estimation de l'état dynamique du véhicule [59].

Les travaux initiaux de Luenberger pour les systèmes linéaires ont fait l'objet d'une recherche active durant les dernières années, pour avoir ses extensions aux systèmes non linéaires, [60], [61], [62], [63].

D'autres méthodes d'observation des systèmes non linéaires ont été élaborées, citons l'observateur grand gain [64], [65], [66], l'observateur utilisant la platitude introduit en [67].

5.2.2. Filtre de Kalman

Nous considérons, dans cette partie, des systèmes modélisés sous forme de représentation d'état à temps discret, de la forme :

$$\begin{cases} x_k = f_k(x_{k-1}, \theta_x, u_k, w_k) \\ y_k = h_k(x_k, \theta_y, v_k) \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Description du système :

- $x_k \in \mathfrak{R}^n$, variables d'état non observées.
- $y_k \in \mathfrak{R}^p$, variables d'observation.
- w_k et v_k bruits de dynamique et bruits de mesure de lois connues.
- f_k et h_k fonctions connues.
- $\theta = (\theta_x, \theta_y)$ paramètres inconnus.
- $u_k \in \mathfrak{R}^m$ variables de commande (les entrées du système).

Le modèle d'un système dynamique, en général, présente plusieurs points qui rendent le problème d'estimation complexe et moins efficace. Nous notons par exemple :

- le modèle peut-être non linéaire
- les bruits peuvent être quelconques (blancs, colorés, gaussiennes, non gaussiennes ...)

Nous noterons dans la suite, $y_{1:k}$ l'ensemble des mesures effectuées de l'instant initial jusqu'à l'instant k .

Le vecteur d'état à l'instant k , x_k , étant une variable aléatoire et les seules informations dont nous disposons sur x_k étant fournies par les mesures $y_{1:k}$, l'information la plus pertinente que le filtre puisse fournir sur x_k et sa loi de probabilité conditionnée sur les mesures : $p(x_k|y_{1:k})$.

Il existe plusieurs extensions du filtre de Kalman. Dans le cas d'un modèle linéaire et de bruits gaussiens, le filtre de Kalman fournit la solution optimale sous la forme d'une expression récursive des deux premiers moments de la distribution gaussienne $p(x_k|y_{1:k})$.

Dans le cas non linéaire, le filtre de Kalman étendu n'apporte que les statistiques des deux premiers ordres de la distribution recherchée. Cette solution non optimale est déduite d'une linéarisation au premier ordre des équations du système dynamique. D'autres extensions du filtre de Kalman ont été proposées pour résoudre le problème non linéaire, tels que le filtre de Kalman Unscented.

5.2.3. Filtre de Kalman pour les systèmes linéaires

On considère un système linéaire à bruits additifs :

$$\begin{cases} x_k = F_k x_{k-1} + b_k u_k + w_k \\ y_k = H_k x_k + v_k \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Où les hypothèses suivantes sont faites :

- L'état initial x_0 est gaussien, d'espérance $\hat{x}_0$ et de covariance $P_0|_0$;
- Les matrices F_k et H_k sont déterministes, appelées respectivement matrices d'état et de mesure. b_k est l'entrée connue du système ;
- Les bruits d'état w_k et de mesure v_k sont des bruits blancs gaussiens de moyennes nulles et de covariances respectives Q_k et R_k connues. Ils sont supposés mutuellement indépendants et indépendants de la condition initiale.

Par linéarité des équations d'état et de mesure, l'état x_k conditionnée sur les mesures $y_{1:k}$ est gaussien. Sa loi de probabilité $p(x_k|y_{1:k})$ est entièrement décrite par son espérance, notée $\hat{x}_{k|k} = E[x_k | y_{1:k}]$ et sa covariance $P_{k|k} = E\left[(x_k - \hat{x}_{k|k})(x_k - \hat{x}_{k|k})^T | y_{1:k}\right]$. Ces deux premiers moments sont calculés récursivement par le filtre de Kalman en deux étapes :

- *Etape de prédiction* : Cette étape propage la connaissance de $p(x_{k-1}|y_{1:k-1})$ jusqu'à l'instant k en utilisant l'équation d'état. Cette étape permet d'obtenir la loi de probabilité $p(x_k|y_{1:k-1})$ qui est également gaussienne et qui est donc entièrement décrite par son espérance notée $\hat{x}_{k|k-1} = E[x_k | y_{1:k-1}]$ et sa covariance $P_{k|k-1} = E\left[(x_k - \hat{x}_{k|k-1})(x_k - \hat{x}_{k|k-1})^T | y_{1:k-1}\right]$.
- *Etape de correction* : Cette étape prend en compte la mesure y_k de façon à corriger la prédiction.

5.2.4. Filtre de Kalman Etendu

On considère le système non linéaire présenté ci-dessus. Ce dernier peut être approché par un modèle linéaire gaussien par linéarisation des équations d'état et de mesure. L'extension la plus simple est obtenue par développement au premier ordre (autour de l'estimée précédente pour l'équation d'état et de la prédiction pour l'équation de mesure) :

$$\begin{cases} f_k(x_{k-1}, u_{k-1}) \approx f_k(\hat{x}_{k-1|k-1}) + F_k(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1|k-1}) \text{ avec } F_k = \nabla f_k(\hat{x}_{k-1|k-1}) \\ h_k(x_k) \approx h_k(\hat{x}_{k|k-1}) + H_k(x_k - \hat{x}_{k|k-1}) \text{ avec } H_k = \nabla h_k(\hat{x}_{k|k-1}) \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Le système linéaire déduit est le suivant :

$$\begin{cases} x_k = F_k x_{k-1} + b_k u_k + w_k & \text{avec } b_k = f_k(\hat{x}_{k-1|k-1}) + F_k \hat{x}_{k-1|k-1} \\ y_k = H_k x_k + v_k \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

L'utilisation du filtre de Kalman pour ce système fournit les équations du filtre de Kalman étendu au premier ordre. Dans le cas où les bruits ne sont plus additifs mais liés de façon non linéaire à l'état et à la mesure, on procède de la même manière. Les fonctions des bruits sont linéarisées autour de 0 afin d'obtenir un système qui peut être résolu par un filtre de Kalman. Des filtres équivalents peuvent être déduits de linéarisation à des ordres supérieurs, mais ils ne sont pas utilisés en pratique pour leur difficulté d'implémentation.

Le filtre de Kalman étendu permet de calculer les deux premiers moments de cette approximation $\hat{x}_{k|k}$ et $P_{k|k}$ par linéarisation. Des études valident son emploi pour la résolution de systèmes avec un bruit d'observation faible [68], [69]. Dans ce cas, l'erreur commise par le filtre est négligeable par rapport à la précision du filtre optimal. Mais dans le cas général, l'erreur commise n'est pas connue.

Si les non linéarités sont trop importants, le filtre de Kalman étendu peut diverger. Cela est d'autant plus vrai que les équations du filtre ne prennent pas en compte l'erreur de linéarisation. Pour remédier à ce problème, quelques heuristiques ont été proposées. D'une part, il est possible d'augmenter la variance des bruits Q_k et R_k afin de prendre en compte cette erreur. D'autre part, une augmentation artificielle de la covariance $P_{k|k}$ permet de limiter la confiance dans les estimées passées. Ces méthodes nécessitent un ajustement précis et difficile des paramètres.

En particulier, la loi de filtrage $p(x_k | z_{1:k})$ peut être décrite par un ensemble de points, on parle donc du filtre de Kalman Unscented.

5.2.5. Filtre de Kalman Unscented

Toujours dans le cadre de l'estimation de systèmes non linéaires, le filtre de Kalman Unscented [70], [71] propose une alternative au filtre de Kalman Etendu. Le principe d'approximation de la loi de filtrage $p(x_k | z_{1:k})$ par une loi gaussienne est conservé. Cependant, il n'y a pas de linéarisation des équations d'état et de mesure. Cela permet d'éviter les deux principaux inconvénients du filtre de Kalman Etendu, à savoir les erreurs de linéarisation et les difficultés d'implémentation des matrices jacobéennes.

A chaque pas de temps, l'approximation du vecteur d'état est représentée par un ensemble de points choisis $\{x_{k|k}^i, i = 1, \dots, N\}$, dits sigma points, auxquels sont associés des poids $\{w_{k|k}^i, i = 1, \dots, N\}$. Ce nuage pondéré permet le calcul de la moyenne $\hat{x}_{k|k}$ et la covariance $P_{k|k}$ de l'approximation. Ces points sont choisis d'une façon bien déterminée.

5.2.6. Avantages et inconvénients :

Le filtre de Kalman est parmi les filtres les plus utilisés dans les applications de filtrage et de l'estimation de l'état dynamique d'un système linéaire. Ce filtre est dit optimal dans le sens où :

L'estimateur $\hat{X}_{k|k}$ est non biaisé, c.-à-d. $E(\hat{X}_{k|k}) = E(X_k)$

$\hat{X}_{k|k}$ est l'estimateur à minimum de variance, car il est celui qui minimise la variance conditionnelle de l'erreur d'estimation, c.-à-d :

$$\hat{X}_{k|k} = \arg \min_E E\{(X_k - E)^T (X_k - E)\} = \arg \min_E [\text{trace} E\{(X_k - E)(X_k - E)^T\}] \quad (\text{Eq 3. 8})$$

Par contre, ce filtre présente certaines faiblesses. En fait, si l'hypothèse gaussienne des bruits est relâchée, mais que les propriétés linéaires du modèle sont conservées, l'utilisation de ce filtre n'est plus possible. Un estimateur linéaire de *variance minimale* de l'état sachant l'ensemble des observations disponibles sera un choix plus raisonnable. Celui-ci conduit finalement aux mêmes équations que le filtre de Kalman.

Dans l'approche de l'EKF, bien que l'EKF pourrait être un bon choix, dans beaucoup de cas il peut échouer puisque le modèle de bruit est souvent inconnu (pas toujours gaussien). Dans ce cas, les hypothèses fausses de bruit peuvent mener aux évaluations décentrées ou même diverger.

Si les non linéarités sont trop importants, le filtre de Kalman Etendu peut diverger. Cela est d'autant plus vrai que les équations du filtre ne prennent pas en compte l'erreur de linéarisation. Le principe du filtre de Kalman Unscented permet de dépasser cette difficulté, cependant, il n'y a pas de linéarisation des équations d'état et de mesure. Cela permet aussi d'éviter les difficultés d'implémentation des matrices jacobéennes. Enfin, pour une étude plus approfondie, [72] décrit en détail différentes méthodes de linéarisation qui améliorent les performances du filtre et éventuellement le simplifient.

6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les différentes méthodes de détermination des variables principales du véhicule. : La mesure et l'estimation. La mesure se fait par des capteurs bien spécifiques et pouvant être parfois chers, nous utilisons dans ce cas les estimateurs. Les capteurs présentés précédemment sont tous disponibles au LIVIC et serviront à mesurer les variables nécessaires pour le développement du système d'alerte.

Les avantages et les inconvénients des principaux types d'estimateurs généralement utilisés ont été présentés dans ce chapitre. Nous remarquons d'après cette étude qu'un modèle de véhicule est nécessaire pour l'application de ces filtres et la détermination des variables désirées. Nous passerons donc à la deuxième partie du rapport qui consiste à utiliser ces capteurs et ces observateurs pour le développement du système d'alerte. Le chapitre suivant a pour objectif de modéliser le système Véhicule-Infrastructure-Conducteur afin de comprendre le fonctionnement de ces trois systèmes et la corporation entre eux. Ce chapitre servira à définir le modèle de véhicule utilisé, les caractéristiques de l'infrastructure et l'environnement influents sur la conduite du véhicule, ainsi que celles du conducteur.

PARTIE II :MODÉLISATION ET ESTIMATION

CHAPITRE 4 : MODÉLISATION DU VÉHICULE, DE L'INFRASTRUCTURE ET DU CONDUCTEUR

1. Introduction

La dynamique du véhicule contribue fortement dans la définition des contraintes de la conduite et des conditions de sécurité. La détermination de la vitesse du véhicule, de son état dynamique de sa stabilité et surtout son positionnement sur la route nécessitent d'avoir un modèle mathématique qui représente sa dynamique et permettra de définir toutes les caractéristique nécessaires pour notre étude. La conduite est le résultat principal des interactions entre le véhicule, l'infrastructure et le conducteur. D'où la nécessité de modéliser ces deux autres facteurs : le conducteur et l'infrastructure. Ce chapitre représente donc une modélisation des trois facteurs principaux de la conduite.

2. Système Véhicule-Infrastructure-Conducteur

Les acteurs principaux de la conduite d'un véhicule sont : le Conducteur, le Véhicule et l'Infrastructure. Ces trois acteurs agissent ensemble en échangeant des informations spécifiques pour assurer la conduite du véhicule. La bonne conduite du véhicule est ainsi garantie en complétant ces trois acteurs principaux par un ensemble de procédés qui permettent de fournir les informations nécessaires au conducteur, la stabilité du véhicule et l'adaptabilité de la conduite aux conditions de l'infrastructure. Ces procédés sont respectivement : les systèmes d'assistance au conducteur, les systèmes d'assistance à la conduite et les capteurs.

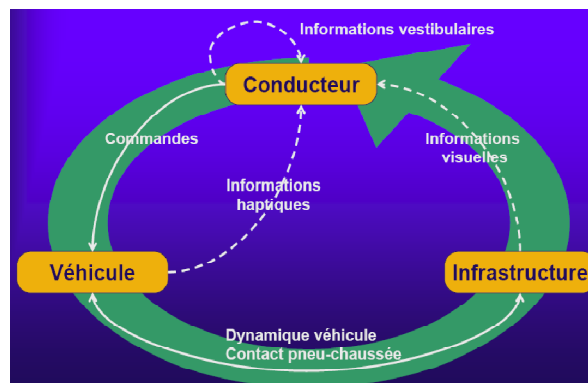


Fig. 4.1 : Fonctionnement du système V-I-C

La (Fig. 4.1) montre les échanges d'information entre les trois actionneurs de la conduite. Ces échanges seront détaillés par la suite pour chacun des actionneurs présentés ci-dessus.

2.1. Le véhicule

Le rôle principal du véhicule est celui d'un récepteur qui reçoit de la part du conducteur les commandes principales souhaitées telles que : l'accélération, l'angle de braquage et la vitesse choisie dans la boîte de vitesse. De la part de l'infrastructure, le véhicule reçoit des informations concernant l'état du contact pneumatique-chausse telle que l'adhérence disponible. Le véhicule peut aussi avoir un rôle de fournisseur qui envoie des informations haptiques au conducteur lui permettant d'identifier la situation de la conduite. Par exemple, une vibration du fauteuil du conducteur permet de lui signaler un début de sortie de route et le pousse à contrôler mieux son véhicule.

2.2. L'infrastructure

L'infrastructure est liée aux deux autres actionneurs : le véhicule et le conducteur. L'infrastructure est essentiellement l'appui qui porte le véhicule. De la part du véhicule, l'infrastructure peut recevoir des informations sur l'état du contact pneumatique-chausse ainsi que sur l'état dynamique du véhicule. Ces informations peuvent être envoyées vers des systèmes d'assistance à la conduite qui constituent les systèmes de collecte d'informations provenant des véhicules tout au long des routes et pouvant les transmettre aux autres pour assurer une bonne conduite et un trafic bien repartie. Pour le conducteur, l'infrastructure permet de fournir des informations sur la position du véhicule sur la route, la trajectoire à suivre, etc.

2.3. Le conducteur

D'après les deux paragraphes précédents, le conducteur est donc un récepteur et un fournisseur en même temps. Il reçoit de l'infrastructure les informations sur la position du véhicule sur la voie et la trajectoire à suivre. Après décision, il fournit au véhicule les commandes choisies en termes de : braquage, accélération et vitesse. Puis il aperçoit de la part du véhicule les réponses à ces commandes sur la dynamique du véhicule et le retour de force sur le volant.

Dans le but d'identifier les rapports d'échanges d'informations ainsi que les influences mutuelles entre les trois actionneurs de la conduite, on présentera dans les paragraphes suivants une modélisation du système V-I-C.

3. Modélisation du véhicule

Le rôle principal du véhicule est de permettre aux usagers de se déplacer en toute sécurité. La modélisation du véhicule est importante pour comprendre le comportement et la dynamique du véhicule afin de l'évaluer pour améliorer son rôle. La modélisation d'un système mécanique consiste à étudier l'évolution de ce système en fonction des entrées et des sorties. Plus précisément, pour modéliser le comportement dynamique du véhicule, il est indispensable de considérer les entrées et les sorties principales de part et d'autre du véhicule.

Le paragraphe (1.1) permet de définir les entrées principales du véhicule en agissant avec le milieu extérieur et le conducteur. Les entrées essentielles du véhicule proviennent du conducteur qui détermine les variables de contrôle par l'intermédiaire du volant, de l'accélérateur, les freins et la boîte de vitesse. L'infrastructure définit les entrées concernant le mécanisme du contact pneumatique-

chaussée. Les forces aérodynamiques peuvent être considérées comme des perturbations provenant du milieu extérieur.

La sortie principale du système véhicule est donc la réponse dynamique permettant de suivre une trajectoire bien définie sous des conditions de conduite spécifiques.

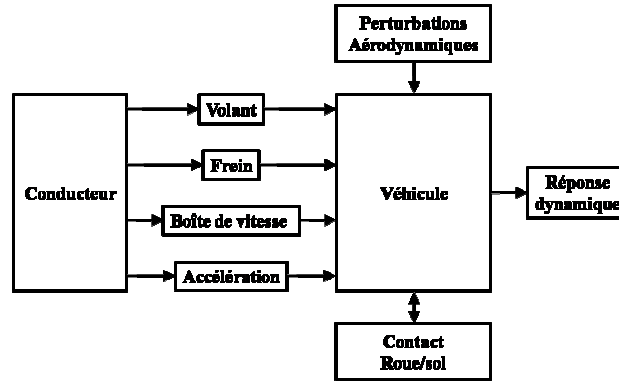


Fig. 4.2 : Comportement mécanique du système véhicule

La modélisation du comportement du véhicule nécessite alors la modélisation des entrées et perturbations principales ainsi que la dynamique du véhicule. Dans les paragraphes (2.1), (2.2) et (2.4) on présentera la modélisation des perturbations aérodynamiques, du contact pneumatique-chaussée et d'un modèle dynamique du véhicule. Les commandes du conducteur seront alors introduites comme des variables d'entrée du modèle dynamique du véhicule. Par contre, il est toujours essentiel de modéliser le comportement du conducteur pour étudier l'influence de ces actions sur la sécurité de la conduite (Fig. 4.2). Une simple modélisation de certain comportement du conducteur sera aussi présentée dans ce chapitre.

3.1. Perturbations aérodynamique

Dans son mouvement sur la route, le véhicule envisage le vent de l'atmosphère. Ce vent exerce à son rôle une pression sur le véhicule qui se traduit par un torseur d'efforts qu'on appelle efforts aérodynamiques. Ce torseur est composé généralement de trois forces et trois moments induits (Fig. 4.3) :

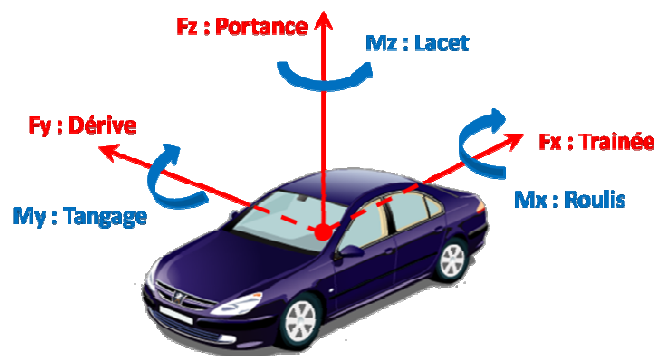


Fig. 4.3 : Forces aérodynamiques appliquées sur le véhicule

- Une force de trainée : $\vec{F}_x$, parallèle à la direction de la vitesse mais dans le sens inverse.

- Une force de dérive : $\vec{F}_y$, perpendiculaire à la direction de la vitesse, dans le plan horizontal.
- Une force de portance : $\vec{F}_z$, perpendiculaire à la direction de la vitesse, dans le plan vertical.
- Un moment de roulis : autour de l'axe longitudinal du véhicule.
- Un moment de tangage : autour de l'axe latéral du véhicule.
- Un moment de lacet : autour de l'axe vertical au plan du véhicule.

Pour les vitesses pratiquées par un véhicule classique, on suppose que la force de portance et les moments générés par la résistance du vent à l'avancement du véhicule, sont négligeables. On s'intéresse donc aux forces longitudinales (trainée) et latérales (dérive) situées dans le plan du véhicule. Les équations des efforts aérodynamiques considérées sont données en fonction de la vitesse et la direction du vent par les équations suivantes :

$$F_{vx} = -\frac{1}{2}\rho_a C_x S_x v_x^2 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$F_{vy} = -\frac{1}{2}\rho_a C_y S_y v_y^2 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Où v_x et v_y sont la projection de la vitesse résultante sur les axes, respectivement, $\vec{x}$ et $\vec{y}$. C_x et C_y représentent respectivement, les coefficients de résistance aérodynamique en longitudinal et en latéral. Ces coefficients sont déterminés par le constructeur suite à des expérimentations. Les coefficients S_x et S_y qui sont aussi donnés par le constructeur, représentent respectivement la surface frontale et transversale du véhicule. ρ_a est la densité de l'air (environ égale à 1,293 kg/m³). La (Fig. 4.4) représente la création de la vitesse résultante sous l'action de la vitesse du vent sur celle du véhicule.

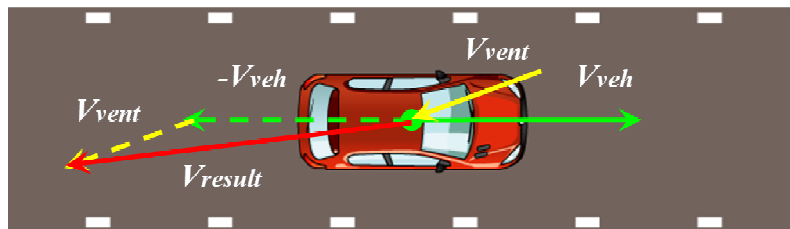


Fig. 4.4 : Direction de la vitesse résultante

Les efforts aérodynamiques sont des forces résistantes à la vitesse du véhicule. Afin de savoir minimiser cet effet sur la conduite, il est intéressant d'étudier l'influence des paramètres permettant de calculer ces efforts.

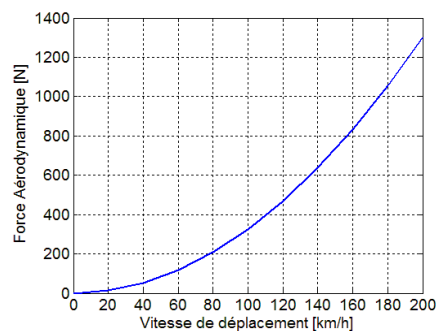


Fig. 4.5 : Variation de la force aérodynamique en fonction de la vitesse

La (Fig. 4.5) représente la force aérodynamique longitudinale (trainée) en fonction de la vitesse d'avancement du véhicule. D'après cette figure on déduit que la force est proportionnelle à la vitesse. La (Fig. 4.6) représente la variation de la courbe force-vitesse en fonction de la variation du coefficient de résistance aérodynamique (Fig. 4.6a) et la surface frontale (Fig. 4.6b).

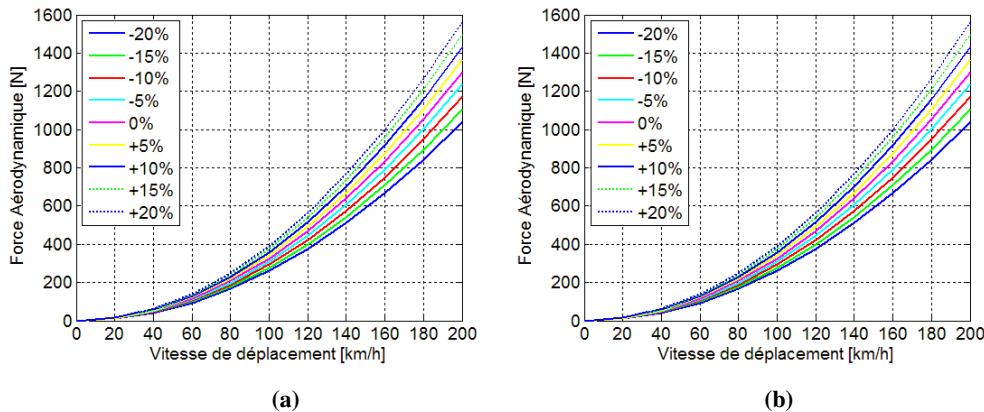


Fig. 4.6 : Variation de la force en fonction de la variation du coefficient aérodynamique (a) et de la surface frontale (b)

D'après la (Fig. 4.6), nous déduisons que les forces aérodynamiques augmentent avec le coefficient aérodynamique et la surface frontale. En effet, cela permettrait de définir la vitesse limite en fonction des caractéristiques géométriques du véhicule en se basant sur le critère de minimisation des forces aérodynamiques.

3.2. Modèle de contact pneumatique-chaussée

Le contact pneumatique-chaussée est la partie essentielle dans le fonctionnement du véhicule. En effet, c'est la surface de contact qui permet de diriger le véhicule sur la route en transmettant les efforts créés par le moteur vers la chaussée. Modéliser le phénomène de contact pneumatique-chaussée est donc très important pour comprendre les efforts du contact et de mieux modéliser le comportement dynamique du véhicule. La modélisation des efforts d'interaction roue-sol a été bien développée récemment. Il existe plusieurs approches dans ce domaine permettant de définir mathématiquement les efforts de contact.

L'une des meilleures approches utilisées dans le but de modéliser le contact roue-sol est celle qui consiste à développer un modèle mathématique décrivant le mieux possible le comportement au niveau de contact. Ce sont des modèles d'ajustement à des résultats expérimentaux. Ce type de modélisation est principalement utilisé pour les simulations les plus avancées de la dynamique automobile.

Parmi ces modèles nous pouvons citer le modèle de Pacejka ou la « Formule Magique » [74]. D'autres modèles peuvent être cités dans ce domaine, tels que les modèles de Dugoff [75], de Kiencke [76], et de Ben Amar [77]. [18] présente aussi une comparaison entre le modèle de Dugoff et de Pacejka. [57] présente aussi une comparaison entre [74], [77] et [75]. Dans ce paragraphe, nous nous limitons à une étude sur plusieurs modèles de contact roue-sol linéaires et non linéaire ainsi qu'une comparaison entre le modèle de Dugoff et celui de Pacejka qui sont les plus utilisés dans le domaine de l'automobile.

3.2.1. Sources des forces pneumatique-chaussée

Les efforts d'interaction entre le pneumatique et la chaussée sont liés aux conditions des actions qui interviennent sur la route (freinage, accélération, braquage, virage, etc.). On peut représenter ces efforts par trois composantes principales suivant les trois axes de contact : axe longitudinal $\vec{x}$, axe latéral $\vec{y}$ et axe verticale $\vec{z}$. Dans les deux sous paragraphes qui se suivent nous présentons l'origine des forces longitudinales et latérales. Concernant les forces verticales ou normales, elles seront présentées en détaille dans le paragraphe (2.3).

La vitesse de glissement entre la roue et la chaussée est à l'origine de la force longitudinale. En effet, d'après la première loi de Coulomb, la résultante des efforts de frottement est une force tangentielle qui s'oppose à la vitesse de glissement.

Lors d'un freinage ou d'une accélération, la vitesse de glissement provoque une torsion du pneumatique suivant son axe de rotation (axe latéral). La vitesse de glissement est la différence entre la vitesse linéaire du véhicule au point de contact roue-sol v_{xi} et la vitesse de roulement du pneu v_{rx} qui s'exprime comme étant la vitesse de rotation de la roue w_i multipliée par son rayon R . La vitesse de glissement v_{sxi} est donc sous la forme ($i = 1 \dots 4$, étant le numéro du pneumatique):

$$v_{sxi} = v_{xi} - R w_i \quad (\text{Eq. 4.3})$$

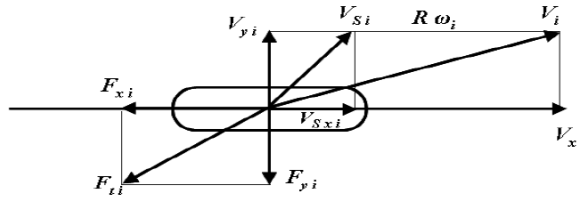


Fig. 4.7 : Direction de la vitesse au point de contact roue-sol

De la même manière, la force latérale est provoquée par la vitesse latérale issue de la projection de la vitesse au point de contact sur l'axe latéral $\vec{y}$. La (Fig. 4.7) montre la vitesse au niveau du contact roue-sol (les deux composantes v_{xi} et v_{yi}) et les forces longitudinale et latérale provoquées. Dans le cas où la différence entre la vitesse linéaire et la vitesse de roulement est nulle, nous aurons alors un roulement sans glissement. Dans ce cas, la force longitudinale sera aussi nulle. Pour mieux quantifier le glissement, nous proposons de considérer le taux de glissement τ qui est représenté par le rapport entre la vitesse de glissement et le maximum de deux valeurs v_{rx} et v_x :

$$\tau_i = \begin{cases} \frac{R w_i}{v_{xi}} - 1, & v_{xi} > R w_i \quad (\text{freinage}) \\ 1 - \frac{v_{xi}}{R w_i}, & v_{xi} < R w_i \quad (\text{accélération}) \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

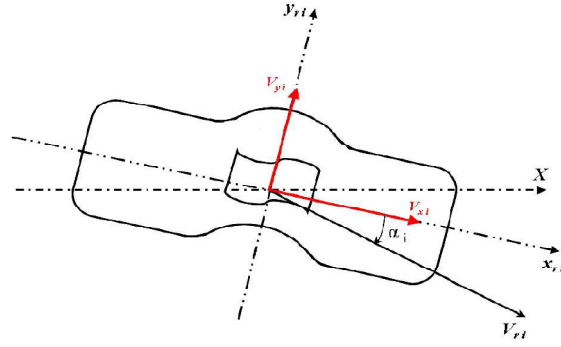


Fig. 4.8 : Angle de dérive au niveau de contact roue-sol

A noter que les deux composantes v_{xi} et v_{yi} sont déterminées par un changement de repère entre le repère du véhicule et celui du pneumatique sous la forme :

$$v_i = v_g + \Omega \wedge P_i \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Avec v_g est la vitesse au centre de gravité du véhicule, v_i la vitesse au point de contact roue/sol, Ω est le vecteur de vitesse de rotation autour de l'axe verticale (mouvement de lacet) et enfin P_i représente le vecteur de position de chaque pneumatique par rapport au repère lié au centre de gravité.

$$\Omega = [0 \quad 0 \quad \dot{\psi}]^T \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$P_i = [l_{xi} \quad l_{yi} \quad 0]^T \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Sous l'effet de la force latérale, le pneu subit des déformations transversales. Cela provoque la création de la dérive qui est donc la variation de la trajectoire du véhicule. L'angle entre le vecteur de vitesse de la roue et le plan de la roue s'appelle « angle de dérive du pneumatique » et noté α (Fig. 4.8). Cet angle est donné par l'équation suivante :

$$\alpha_i = \delta_i - \arctan\left(\frac{v_{yi}}{v_{xi}}\right) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Où v_{xi} et v_{yi} représentent les vitesses longitudinale et latérale du véhicule au niveau du point de contact roue/sol respectivement et δ_i est l'angle de braquage de chaque roue.

L'évolution des forces pneumatique-chaussée en fonction du comportement dynamique du véhicule sur la route, montre qu'il existe trois régimes principaux de contact roue-sol (Fig. 4.9).

- Le régime de pseudo-glissement linéaire : c'est la zone linéaire dans laquelle nous ne mobilisons pas une grande partie de l'adhérence disponible sur la route. Dans ce cas les forces varient d'une manière linéaire avec le glissement.
- Le régime de pseudo-glissement : c'est la zone d'une forte mobilisation de l'adhérence mais le véhicule reste contrôlable.
- Le régime de glissement total : c'est la zone de saturation où le véhicule devient difficilement contrôlable.

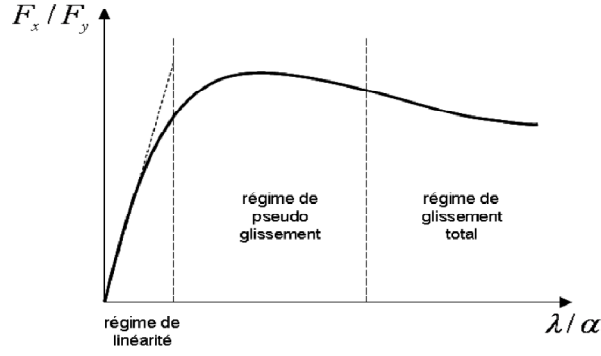


Fig. 4.9 : Evolution des efforts d'interaction roue-sol en fonction du glissement

3.2.2. Modèles linéaires

D'après l'étude de l'évolution des forces pneumatique-chaussée dans le paragraphe précédent nous pouvons remarquer que dans la zone du régime de pseudo-glissement linéaire, la courbe est assimilable à sa tangente. En conduite normale, les forces générées le sont dans cette zone. Il peut donc être acceptable de considérer un modèle linéaire des forces de contact roue-sol sous la forme :

$$F(x) = \mu C_p x \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Où, C_p (C_x en longitudinale ou C_y en latérale) est la raideur du pneumatique, x est le glissement (le taux de glissement τ dans le cas longitudinal et l'angle de dérive α dans le cas latéral), et μ représente le coefficient d'adhérence de la route. Cette formulation est simple pour être utilisée dans des simulations avancées dans le domaine de l'automobile sauf qu'elle est seulement valable pour des faibles valeurs de x . Il est donc important de regarder les modèles linéaires du contact pneumatique-chaussée pour les utiliser dans notre étude.

3.2.3. Modèles non linéaires

Nous pouvons trouver dans la littérature plusieurs modèles permettant de modéliser le contact pneumatique-chaussée. Parmi ces modèles nous notons les modèles de Pacejka [74], de Dugoff [75] que nous allons développer et comparer pour déterminer lequel parmi les deux nous allons utiliser dans notre étude.

Modèle de Dugoff

Le modèle de Dugoff permet de déterminer les efforts d'interaction roue-sol en fonction de l'angle de glissement α , le taux de glissement τ , la force normale F_n , et les raideurs du pneumatique (C_x et C_y). Ce modèle permet d'étudier le couplage entre les efforts longitudinaux et latéraux. Les efforts sont alors donnés par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} F_{lon} = C_x \frac{\tau}{1-\tau} \kappa \\ F_{lat} = C_y \frac{\tan \alpha}{1-\tau} \kappa \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Avec :

$$\kappa = \begin{cases} (2 - \sigma)\sigma, & \sigma < 1 \\ 1, & \sigma \geq 1 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Où :

$$\sigma = \frac{(1-\tau)\mu F_n}{2\sqrt{C_x^2\tau^2 + C_y^2\tan^2\alpha}} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

En isolant le terme $\frac{\kappa}{1-\tau}$, nous pouvons remarquer que les expressions du modèle de Dugoff sont proches de la formulation linéaire des efforts d'interaction. De même, ce terme permet de définir la relation entre les efforts et la force normale provoquée par la charge du véhicule. La (Fig. 4.10) représente l'influence de la variation des paramètres α et τ sur la valeur de κ .

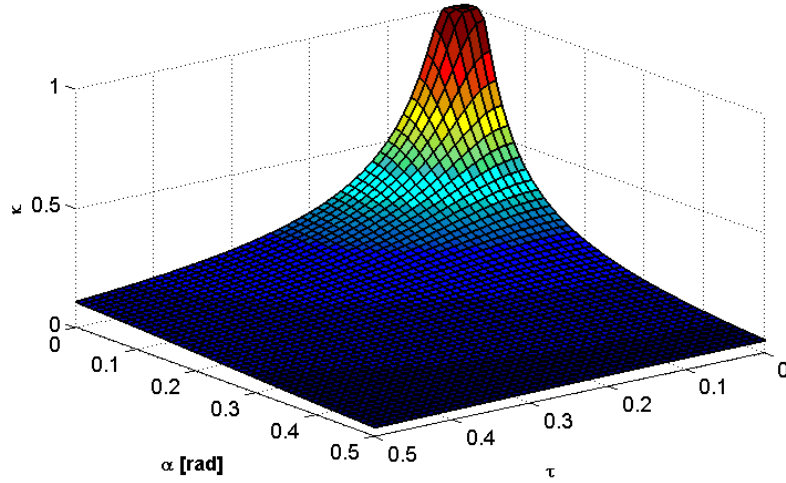
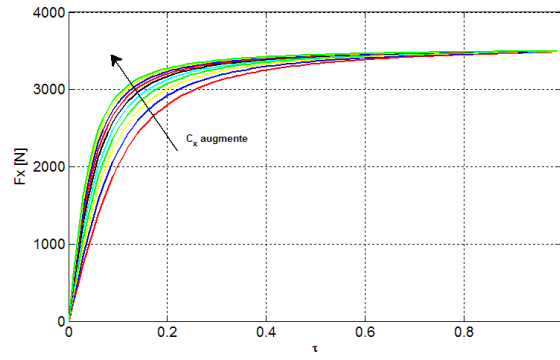
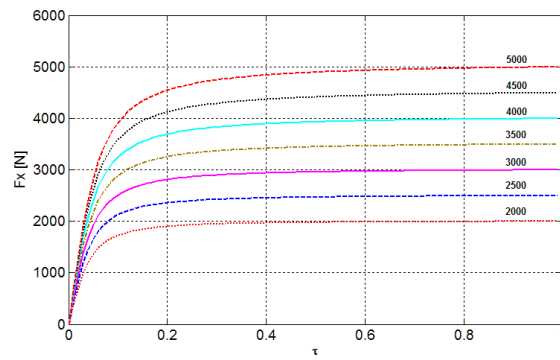


Fig. 4.10 : Variation du paramètre κ en fonction du taux de glissement et de l'angle de dérive

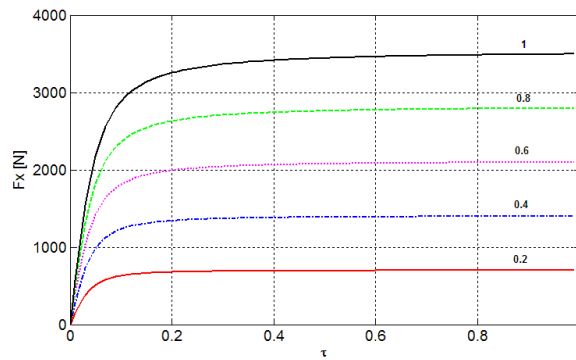
Pour mieux comprendre l'influence des paramètres du modèle de Dugoff sur le calcul des efforts d'interaction, nous représentons par la (Fig. 4.11) la variation de la force longitudinale en fonction de la variation de la force normale, l'adhérence, et la raideur du pneumatique.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.11 : Variation de la force longitudinale en fonction de la variation de la raideur du pneumatique (a), la force normale (b) et l'adhérence (c)

Les expressions du modèle de Dugoff nous permettent d'étudier le couplage entre les efforts longitudinaux et latéraux du contact pneumatique-chaussée. Nous présentons donc par la (Fig. 4.12) l'ellipse de friction de Dugoff. Sur cette ellipse nous pouvons remarquer que la force maximale que peut développer le pneumatique en longitudinal ou en latéral est limitée à μF_n .

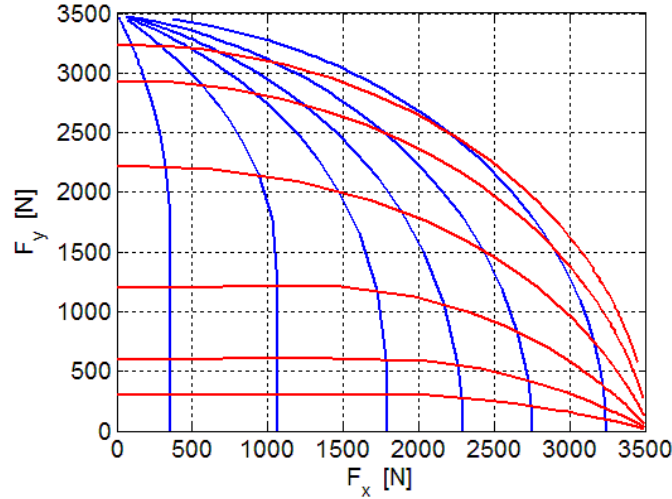


Fig. 4.12 : Ellipse de friction de Dugoff

Les équations de Dugoff représentent alors une formulation facile à utiliser (peu de paramètres à déterminer). Les résultats obtenus par ce modèle sont parfaitement acceptables.

Modèle de Pacejka

Une modélisation des efforts de contact pneumatique-chaussée a été présentée par Bakker, Pacejka et Lidner [78]. Ce modèle permet de déterminer les efforts longitudinaux et latéraux par un seul système de calcul présenté sous la forme :

$$\begin{cases} X = x + S_h \\ Y = D \sin(C \arctan(BX - E(BX - \arctan(BX)))) \\ F(x) = Y + S_v \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Où x représente le taux de glissement τ pour le mode longitudinal ou l'angle de dérive α pour le mode latéral. Les paramètres B , C , D , E , S_h , et S_v sont des coefficients dont la valeur dépend de la force normale appliquée au pneumatique, de l'angle entre le pneumatique et la verticale à la route (angle de carrossage γ), des caractéristiques du pneumatique et du mode étudié. Ils ont une signification physique :

- B : coefficient de raideur.
- C : facteur de forme.
- D : valeur maximale.
- E : courbure.
- S_h : décalage à l'origine en horizontal.
- S_v : décalage à l'origine en vertical.

Les expressions des paramètres B , C , D , E , S_h , et S_v sont données de manières différentes pour le mode longitudinal et latéral sous la forme :

En mode longitudinal :

$$\begin{aligned}
 \mu_{xm} &= b_1 F_n + b_2 \\
 D &= \mu_{xm} F_n \\
 BCD &= (b_3 F_n^2 + b_4 F_n) \exp(-b_5 F_n) \\
 C &= b_0 \\
 E &= b_6 F_n^2 + b_7 F_n + b_8 \\
 B &= BCD / CD \\
 S_h &= b_8 F_n + b_{10} \\
 S_v &= 0
 \end{aligned}$$

En mode latéral :

$$\begin{aligned}
 \mu_{ym} &= a_1 F_n + a_2 \\
 D &= \mu_{ym} F_n \\
 BCD &= a_3 \sin(2 \arctan(F_n / a_4)) (1 - a_5 \|\gamma\|) \\
 C &= a_0 \\
 E &= a_6 F_n + a_7 \\
 B &= BCD / CD \\
 S_h &= a_8 \gamma + a_9 F_n + a_{10} \\
 S_v &= a_{11} \gamma F_n + a_{12} F_n + a_{13}
 \end{aligned}$$

Les coefficients $a_i (i = 1 \dots 13)$ et $b_j (j = 1 \dots 10)$ sont strictement liés aux caractéristiques du pneumatique et sont difficiles à déterminer (ils sont toujours fournis par le constructeur). De plus, ils évoluent dans le temps (usure du pneumatique).

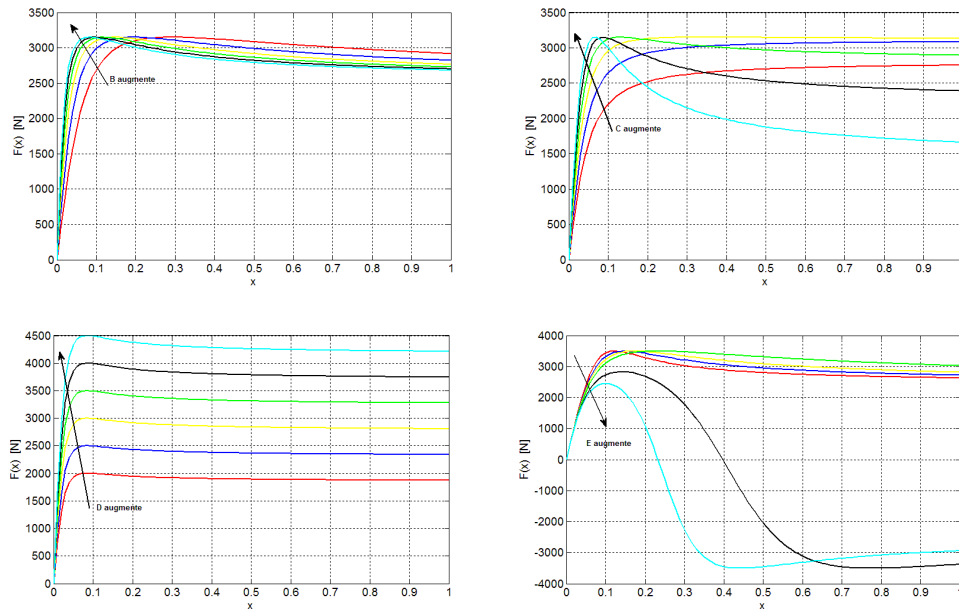


Fig. 4.13 : Profil des efforts obtenus par la formulation de Pacejka

La (Fig. 4.13) montre les résultats obtenus au niveau des forces de contact d'un pneumatique dont la force normale est de 3500N en utilisant le modèle de Pacejka. Ces résultats sont obtenus en variant les paramètres de Pacejka : B , C , D et E .

Comparaison entre les modèles de Dugoff et Pacejka

Une simple comparaison entre le modèle de Dugoff est celui de Pacejka peut être faite en déterminant les efforts longitudinaux et latéraux par chaque modèle pour le même état de conduite. Si nous comparons donc les efforts obtenus dans les paragraphes précédents par Dugoff et Pacejka respectivement, nous aurons les résultats présentés par la (Fig. 4.14). Sur cette figure, nous montrons les efforts générés par chaque modèle pour différentes valeurs d'adhérence. Pour plus quantifier cette comparaison, nous calculons l'erreur entre les deux modèles. Les résultats sont alors présentés par la (Fig. 4.15).

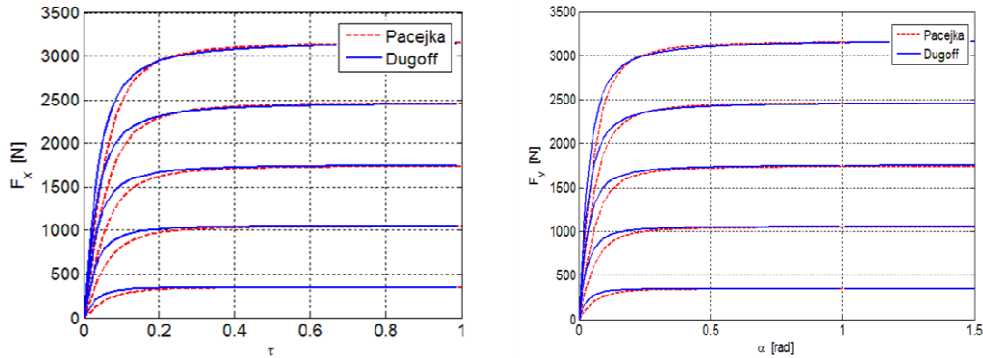


Fig. 4.14 : Comparaison des efforts longitudinaux et latéraux obtenus par Dugoff et Pacejka

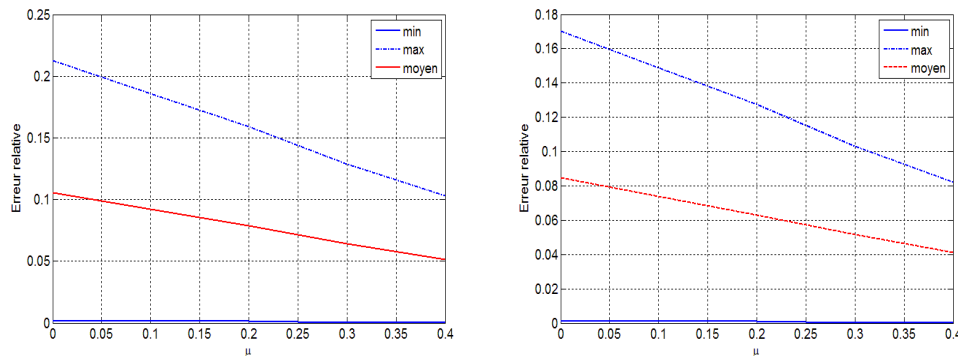


Fig. 4.15 : Erreur relative entre les efforts générés par Dugoff et Pacejka

La comparaison au niveau des erreurs entre le modèle de Dugoff et celui de Pacejka ne permet pas de choisir strictement entre les deux modèles. En fait, le modèle de Pacejka permet d'avoir une représentation plus réaliste des différents phénomènes se produisant au niveau du contact pneumatique chaussée. Le modèle de Dugoff, malgré sa limitation qui consiste à ne pas avoir une redescente lors de la mobilisation maximale de l'adhérence, a l'avantage d'avoir une représentation relativement réaliste et d'utiliser peu de paramètres pour représenter les efforts de contact pneumatique-chaussée. Au contraire, le modèle de Pacejka nécessite une connaissance précise du pneumatique. Pour cela, nous choisissons d'utiliser le modèle de Dugoff dans notre étude.

3.3. Force normale et transfert de charge

Le véhicule de par le contact pneumatique-chaussée, exerce une action sur la chaussée définie par son poids au niveau des roues. La chaussée exerce alors en retour une réaction sur les roues du véhicule. Cette réaction est connue par la force normale, noté F_{ni} . En équilibre, la distribution de la

charge du véhicule est identique sur les quatre roues. Nous obtenons alors les quatre forces normales sous la forme :

$$\begin{cases} F_{n1,2} = \frac{l_{ar}}{2(l_{ar}+l_{av})} mg \\ F_{n3,4} = \frac{l_{av}}{2(l_{ar}+l_{av})} mg \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

m étant la masse du véhicule, g l'accélération de la gravité et l_{av} et l_{ar} les distances entre le centre de gravité du véhicule et les essieux avant et arrière. Ces forces sont exercées suivant l'axe vertical (perpendiculaire au plan de contact pneumatique-chaussée) vers le haut. Durant son trajet, le véhicule subit des changements dynamiques issus des différentes manœuvres du conducteur établies pour suivre la trajectoire de la route ou même pour éviter des situations critiques. Ce changement dynamique entraîne un changement au niveau de la répartition uniforme de la charge sur les quatre roues. Nous remarquons alors, un transfert de charge vers les roues avant (pendant un freinage), arrière (pendant une accélération) ou même d'un côté à l'autre (dans un virage).

La répartition de la charge n'étant plus uniforme, il est indispensable de déterminer la force normale appliquée sur chaque roue afin d'analyser le comportement dynamique du véhicule en virage. En effet, la force normale sur une roue influe sur la détermination des forces longitudinale et latérale au niveau du contact roue-sol. Les équations de calcul des forces normales sont alors écrites en fonction de la géométrie de la route (pente et devers) ainsi que la géométrie du véhicule (longueur, largeur et masse) sous la forme donnée par [79] :

$$\begin{cases} F_{n1} = \frac{l_{ar}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{l_{ar}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \\ F_{n2} = \frac{l_{ar}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{l_{ar}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \\ F_{n3} = \frac{l_{av}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{l_{av}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \\ F_{n4} = \frac{l_{av}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{l_{av}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

A noter que la seule limite de cette formulation est qu'elle est en régime établi et non pas en régime transitoire.

3.4. Modèle du véhicule

Après avoir présenté les différents efforts extérieurs appliqués sur le véhicule pendant son mouvement sur la route et afin d'étudier la dynamique nécessaire pour aboutir à notre objectif représenté dans le chapitre suivant par l'estimation de l'angle de dérive, nous avons besoin de développer un modèle simple de véhicule tout en décrivant l'état dynamique le plus proche possible de la réalité pour suivre la trajectoire souhaitée.

3.4.1. Mouvement du véhicule

En roulant, le véhicule effectue deux types de mouvements : mouvement de translation et mouvement de rotation. Afin de distinguer les différents mouvements, nous proposons de définir les différents repères nécessaires.

Le premier repère principal R_t est celui qui est lié à la terre, c'est le repère « absolu » qui reste toujours fixe. Le deuxième repère principal R_v est celui qui est lié au châssis du véhicule. Ce repère a pour origine le centre de gravité G du véhicule. Il se déplace avec le mouvement global du véhicule

sur la route et permet d'indiquer sa position sur la chaussée ainsi que les trois mouvements de translation tout au long des trois axes. D'autres repères secondaires sont nécessaires pour décrire le mouvement de la caisse du véhicule par rapport au châssis. En effet, tout au long du trajet, le véhicule est soumis aux effets de son comportement dynamique. Par exemple, pendant un virage le véhicule est soumis à l'effet centrifuge qui tend à tourner sa caisse autour de son axe longitudinale. C'est la rotation qu'on appelle le « roulis » et qui est décrit par le repère R_r . De même, le véhicule est aussi capable d'avoir une rotation autour de son axe principale verticale. C'est le mouvement de « lacet » qui est représenté par le repère R_l . Dans le cas d'un freinage ou d'une accélération, la caisse du véhicule tourne autour de l'axe latéral du repère principale R_v . C'est le mouvement appelé « tangage » lié à un repère appelé R_t . La (Fig. 4.16) représentent, les trois rotations du véhicule et les différents repères utilisés.

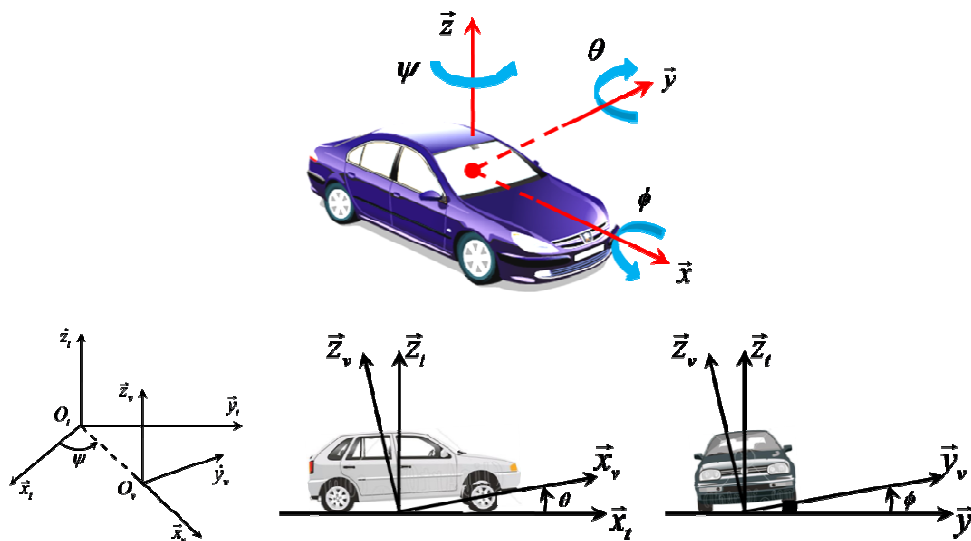


Fig. 4.16 : Axes principaux pour la description des différents mouvements du véhicule

3.4.2. Expressions du modèle du véhicule

Nous avons présenté dans les paragraphes précédents de ce chapitre les différents efforts extérieurs pouvant être appliqués sur le véhicule pendant son déplacement sur la route. Il suffit donc d'appliquer le principe fondamental de la dynamique sur un modèle « véhicule » pour obtenir les différentes équations permettant de décrire le mouvement.

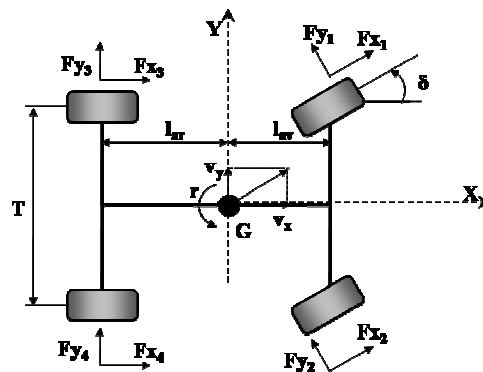


Fig. 4.17 : Modèle de véhicule à quatre roues

Le modèle du véhicule choisi est celui élaboré par [18]. C'est un modèle simplifié qui représente un véhicule à quatre roues avec un essieu direction avant (Fig. 4.17). Dans ce modèle, on peut distinguer les différentes caractéristiques géométriques d'un véhicule standard telles que la largeur de l'essieu, la position du centre de gravité par rapport aux essieux avant et arrière. Si nous appliquons alors le principe fondamental de la dynamique sur ce modèle, nous obtenons les équations décrivant la dynamique du véhicule sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \frac{1}{m} \sum F_{xi} + \psi v_y \\ \dot{v}_y = \frac{1}{m} \sum F_{yi} - \psi v_x \\ \dot{\psi} = \frac{1}{I_z} \sum M_{zi} \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Où l'état dynamique du véhicule est défini par les trois variables : vitesse longitudinale v_x , vitesse latérale v_y et le lacet ψ . Cet état est alors estimé par les valeurs des différentes forces (longitudinales, latérales et normales), les efforts aérodynamiques, et le moment suivant l'axe vertical M_{zi} .

3.4.3. Evaluation du comportement du modèle

Avant d'utiliser le modèle pour déterminer les variables nécessaires pour notre étude, il est recommandable de vérifier si le modèle choisi est bien valable pour représenter le comportement dynamique du véhicule. Pour cela, nous allons appliquer ce modèle sur une trajectoire bien définie dont on connaît déjà la réponse approximative du véhicule vis-à-vis de cette trajectoire. Nous choisissons ainsi de valider le modèle sur une trajectoire d'évitement d'un obstacle qui peut être aussi similaire à celle d'un dépassement. La (Fig. 4.18) représente en même temps la trajectoire dans le plan $(\vec{x}, \vec{y})$ ainsi que le braquage correspondant pour la suivre avec une vitesse constante égale à 25 m/s. Cependant, pour solliciter la dynamique du système, nous avons ajouté un bruit gaussien sur les mesures et les variables d'entrée.

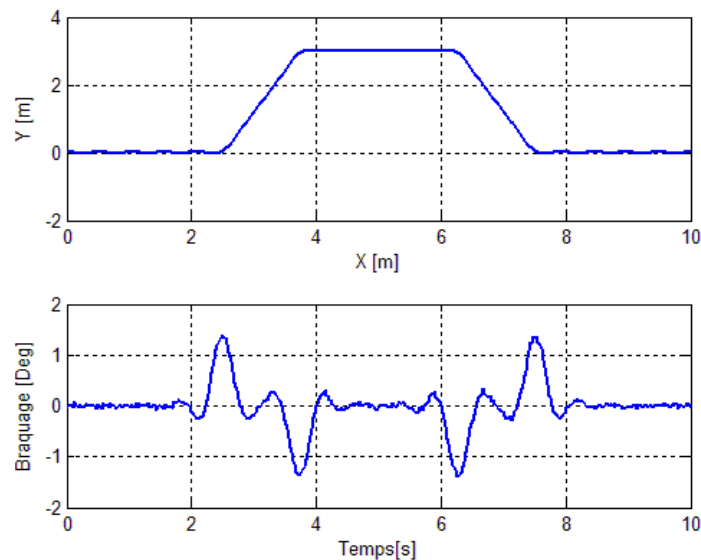


Fig. 4.18 : Trajectoire et braquage de validation

En appliquant le modèle de véhicule à quatre roues développé précédemment sur cette partie de la route, nous obtenons la réponse du véhicule en tant qu'état dynamique. Cet état est défini par la

vitesse longitudinale $\vec{v}_x$, la vitesse latérale $\vec{v}_y$, et la vitesse de lacet r . La (Fig. 4.19) montre cette réponse qui correspond bien à la trajectoire choisie. En fait, la vitesse longitudinale qui est égale à 25 m/s subit une petite variation due aux faibles glissements latéral et longitudinal. De même, nous remarquons que la vitesse latérale et la vitesse de lacet sont compatibles avec la trajectoire choisie.

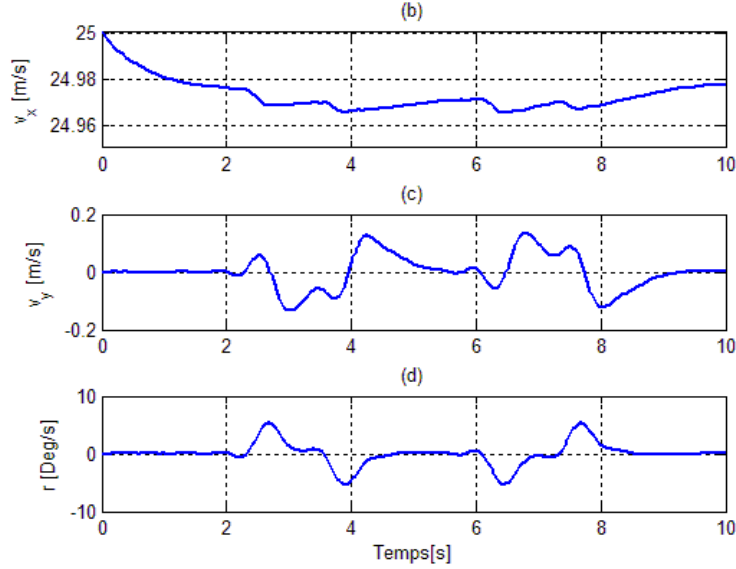


Fig. 4.19 : Réponse du véhicule en état dynamique

Finalement, les figures (Fig. 4.20), (Fig. 4.21) et (Fig. 4.22), représentent la réponse du véhicule au niveau des forces de contact roue/sol longitudinales, latérales et normales.

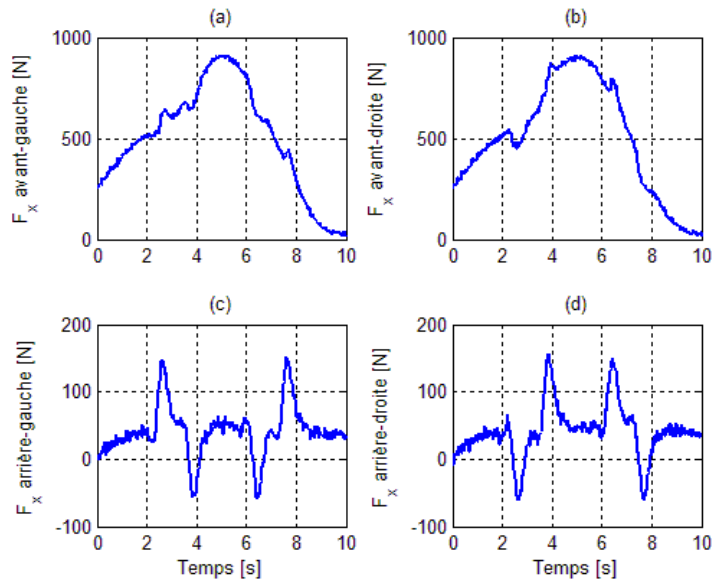


Fig. 4.20 : Forces longitudinales de contact roue/sol

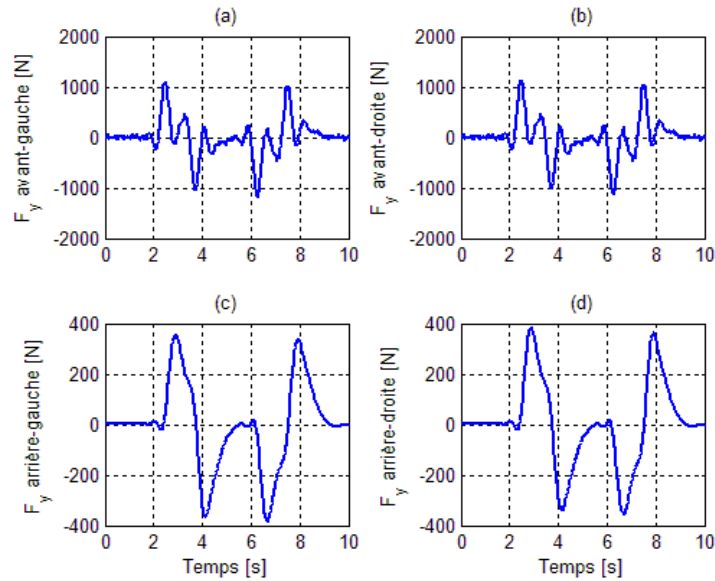


Fig. 4.21 : Forces latérales de contact roue/sol

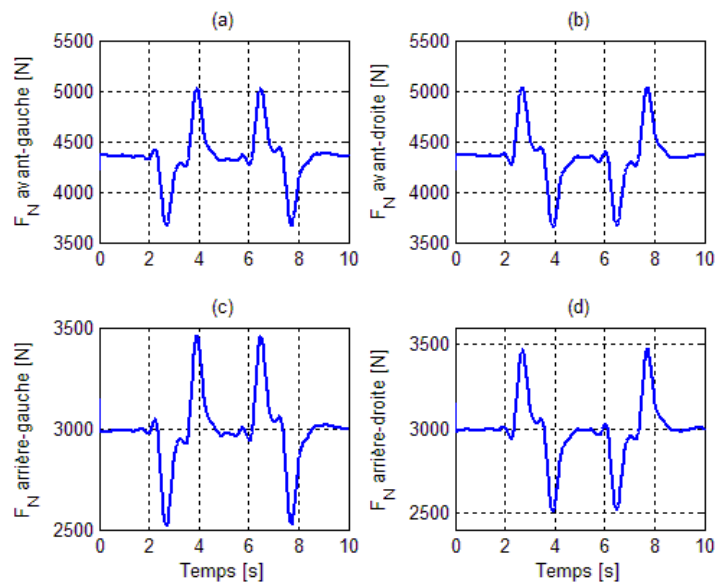


Fig. 4.22 : Forces normales de contact roue/sol

4. Modélisation de l'infrastructure

La modélisation de l'infrastructure est nécessaire pour comprendre les caractéristiques de la route sur laquelle les véhicules se déplacent. En effet, la connaissance des différentes caractéristiques est nécessaire pour notre étude qui visera à déterminer la vitesse limite en fonction de toutes les conditions extérieures. Par conséquent, nous allons voir dans le chapitre (7), l'utilité de la modélisation de l'infrastructure sur la vitesse limite. En France, on peut distinguer trois types de routes principales interurbaines :

- Les routes de type L : ce sont les liaisons entre les régions et les départements. On les appelle les « autoroutes ».

- Les routes de type T : ce sont les routes de transit, pour lesquelles le trafic de transit est privilégiée. Elles sont appelées les « routes express à une chaussée ».
- Les routes de type R : ces routes constituent l'essentiel des réseaux des voies principales de rase campagne. Elles sont aussi appelées les routes « multifonctions ».

Selon les systèmes nationaux, nous pouvons associer, à chacun de ces types de routes, une vitesse dite de référence. Ainsi une route de catégorie R80 sera une route multifonction avec comme vitesse de référence 80 km/h. Ces systèmes permettent aussi de déterminer la vitesse limite pour chaque type. Un tableau détaillé a été présenté dans le chapitre (1) comprenant la limitation de la vitesse selon le type de la route. Cependant, nous présentons dans le (Tab. 4.1) la limitation de la vitesse, ainsi que les catégories possibles de chaque type.

Type de route	R (Routes)	T (Routes express)	L (Autoroutes)
Limitation de vitesse	90 km/h	90 km/h	130 km/h ou 110 km/h
Catégories possibles	R60 ou R80	T80 ou T100	L100 ou L120

Tab. 4.1 : Limitations et catégories des différents types de route

Tous les types de voies distingués ci-dessus ont les mêmes caractéristiques géométriques essentielles pour assurer la bonne conduite et la sécurité routière tout en prenant en considération l'infrastructure. Parmi ces caractéristiques nous pouvons citer celles qui sont essentielles : la courbure, le devers et la pente. L'objectif de ce paragraphe est donc de modéliser la route par sa géométrie décrite par ces trois variables (rayon de courbure R , devers d , pente p) et de déterminer les limitations au niveau de la construction de la chaussée.

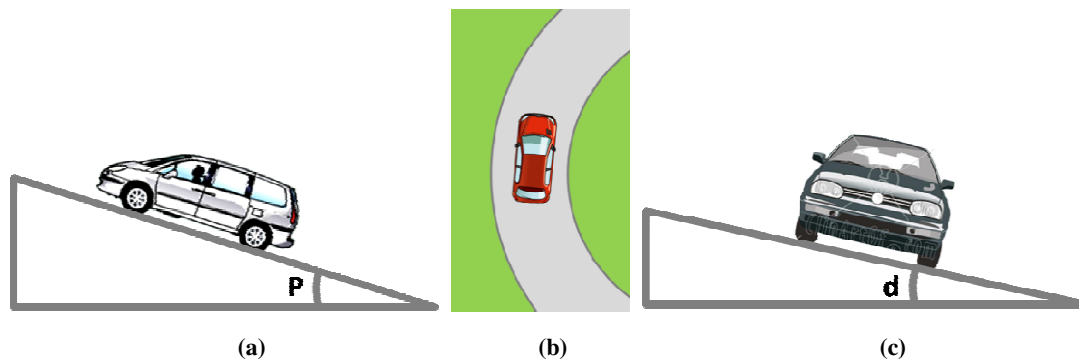


Fig. 4.23 : Variables principales de la route : pente (a), courbure (b) et devers (c)

4.1. La courbure

La courbure de la route est le paramètre essentiel définissant la trajectoire à suivre. La courbure est en effet l'inverse du rayon de courbure. Nous pouvons distinguer trois formes géométriques différentes :

- Ligne droite : elle correspond à une section avec courbure nulle ou rayon de courbure infini.
- Cercle : il correspond à une section circulaire de rayon de courbure constante.

- Clothoïde : c'est une section où la courbure varie linéairement avec l'abscisse curviligne s . Elle permet d'avoir une jonction entre les lignes droites et les sections de cercle tout en conservant une variation acceptable de l'accélération latérale.

L'aménagement des routes impose des contraintes au niveau de la construction des virages (clothoïde et cercle) concernant le champ de vision du conducteur. Il est toujours recommandé d'avoir une bonne perception de la variation de courbure ainsi qu'une distance de visibilité minimale assurant une conduite sécurisée. Nous présenterons plus des détails sur la visibilité et la courbure dans le chapitre (7).

4.2. Le dévers

Le dévers est par définition l'inclinaison de la route autour de son axe latéral (Fig. 4.23). Il a pour but de minimiser l'accélération latérale du véhicule dans le virage. Sur une route droite et plane, le dévers permet aussi d'évacuer les eaux de la pluie. Il est généralement compris entre 2,5 % et 7 % selon la nature de la route et le rayon de courbure. Des équations permettant de déterminer le dévers en fonction du rayon de courbure et inversement, seront présentées dans le chapitre (7).

4.3. La pente

La pente de la route est par définition l'inclinaison de la route autour de son axe latéral (Fig. 4.23). L'origine des pentes des routes est la nature de l'infrastructure qui impose des contraintes empêchant de construire une route plane. Cependant, la détermination de la pente est reliée à la dynamique du véhicule et le confort du conducteur et le type de la route, qui exigent des limitations. Le (Tab. 4.2) représente la pente maximale en fonction du type de routes.

Type de route	R60	R80 ou T80	T100	L100	L120
Pente maximale (%)	7	6	5	5	5

Tab. 4.2 : Pente maximale autorisée pour chaque type de route

5. Caractéristiques du conducteur

Dans le premier paragraphe de ce chapitre, nous avons présenté les trois acteurs qui constituent le système VIC responsable d'assurer la conduite dont le conducteur est parmi ces acteurs principaux. Des études statistiques présentées dans le deuxième chapitre montrent que le conducteur est une cause principale des accidents. En outre de ces causes extérieures liées à l'état du conducteur pendant la conduite, des études ont été faites pour détecter les causes des accidents liées au comportement du conducteur au volant : on parle de la modélisation du conducteur. Cette modélisation a pour objective de définir les actions du conducteur au volant et donc l'influence de ces actions sur la détermination de la vitesse limite. Ces études ont pour conséquence de simplifier l'interaction entre le conducteur d'une part et le véhicule et l'infrastructure d'autre part dans le système VIC. Nous pouvons en distinguer deux catégories principales : la modélisation macroscopique et la modélisation microscopique du conducteur.

La modélisation macroscopique consiste à définir un modèle qui décrit son comportement dans une situation de conduite bien définie. Cette modélisation a pour objectif d'obtenir des modèles mathématiques utilisés pour le développement des systèmes de contrôle lors de la conception du

véhicule. La deuxième concerne des études statistiques pour définir le profil du conducteur (expérimenté, débutant, etc.) en vue d'élaborer un modèle cognitif [80] et la modélisation du trafic routier et les interactions entre les usagers.

- Le braquage : il se décrit par l'angle au volant défini par le conducteur.
- La vitesse : elle est définie par le rapport de la boîte de vitesses.
- Les actions sur les pédales : cela correspond à une accélération issue de la pédale d'accélération et un freinage sur la pédale de frein.

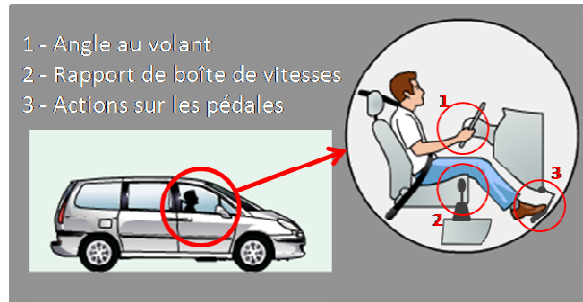


Fig. 4.24 : Actions principales du conducteur

Avant de modéliser le conducteur dans son environnement dans le système VIC, il est recommandé de comprendre le rôle principal du conducteur : ses actions ou ses commandes appliquées envers la dynamique du véhicule. En examinant le conducteur au volant, nous pouvons distinguer trois actions exercées sur le véhicule (Fig. 4.24):

L'objectif de notre travail consiste à développer un système d'alerte à des vitesses excessives. Pour aboutir à notre objectif, il est nécessaire de passer par une modélisation microscopique, simple, du conducteur. Nous nous suffisons donc de modéliser le conducteur par l'intégration de son temps de réaction, son accélération longitudinale et la quantité d'adhérence qu'il mobilise en longitudinal et en latéral.

5.1. Temps de réponse

Face à un événement imprévu, le conducteur réagit toujours avec un léger temps de décalage. Ce temps est constitué du temps physiologique de perception-réaction que met le conducteur pour prendre conscience d'une situation critique et d'agir (1.3 à 1.5 secondes) et le temps mort mécanique d'entrée en action des freins (~ 0.5 secondes). Pour le calcul, on adopte généralement la valeur de 2 secondes pour ce temps de perception réaction quelle que soit la vitesse même s'il est admis qu'en situation d'attention soutenue (vitesse supérieure à 100 km/h ou trafic soutenu à vitesse importante) ce temps peut être réduit à 1.8 secondes. Toutefois, une modification de 0.2 secondes joue peu sur la distance d'arrêt (par exemple : 5m à 90 km/h). Les recherches montrent aussi que le temps physiologique de perception-réaction change d'un conducteur à l'autre.

Ce temps de réaction dépend de plusieurs facteurs complexes, nous citons quelques-uns :

- l'inattention du conducteur (la recherche de l'itinéraire, le fait de manger, etc.).
- l'état physique (fatigue, maladies, âge, etc.).
- les conditions atmosphériques (mauvaise visibilité, chaussée glissante, neige).
- la distraction (l'alcool, utilisation de radio ou de téléphones mobiles, etc.).

5.2. Mobilisation de l'adhérence disponible

Pour des raisons de confort et de sécurité, le conducteur ne mobilise pas toute l'adhérence disponible sur la route [18]. Les sollicitations du conducteur en accélérations (latérale et longitudinale) vont alors lui permettre de mobiliser une partie de l'adhérence disponible en latéral ainsi qu'en longitudinal pour achever la manœuvre nécessaire pour la conduite. La (Fig. 4.25) représente la zone du conducteur qui décrit la limite d'adhérence que le conducteur peut mobiliser, ainsi que la zone d'action de certains systèmes d'assistance comme l'ABS, l'ESP et l'anti-patinage.

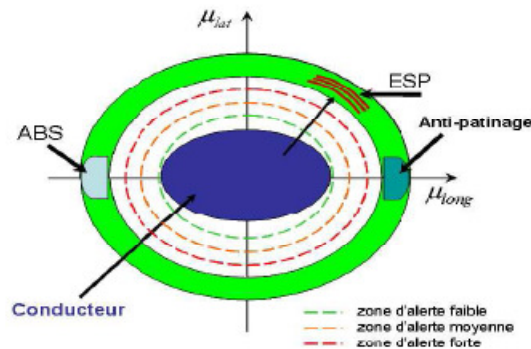


Fig. 4.25 : Zone de mobilisation de l'adhérence par le conducteur et les zones d'alerte

L'augmentation de la quantité d'adhérence mobilisée par le conducteur, permet de déterminer les zones d'alerte. Lorsque le conducteur commence à rentrer dans une des zones d'action d'une assistance, il se trouve déjà dans un état dégradé de la conduite. Mais ces systèmes d'assistance l'aident à conserver la manœuvrabilité de son véhicule.

5.3. Accélération longitudinale et latérale

L'accélération est l'une des actions du conducteur présentées dans le paragraphe (4). Ce paramètre est déterminé par l'action du conducteur sur la pédale d'accélération. C'est une caractéristique qui permet de distinguer les comportements des conducteurs devant différents scénarios de conduite.

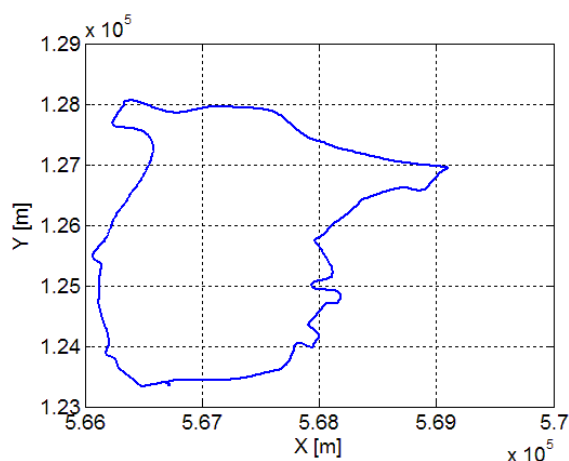


Fig. 4.26 : Trajectoire GPS

Des expérimentations ont été faites dans le cadre du projet ARCOS sur une piste routière dans le département des Yvelines afin de déterminer ce paramètre par 36 conducteurs. Les

expérimentations consistent à identifier l'accélération pratiquée par les conducteurs pour passer une trajectoire bien choisie. Nous nous intéressons dans notre étude à l'accélération longitudinale et latérale du conducteur. Pour ce but nous avons choisi une partie de la trajectoire, qui est une chicane. Cette partie nous permettra d'identifier les accélérations longitudinale et latérale. Plusieurs conducteurs ont participé à ces expérimentations. La (Fig. 4.27) montre le trajet des expérimentations ainsi que la chicane choisie pour identifier les accélérations. La (Fig. 4.26) représente les coordonnées GPS de la trajectoire suivie par les expérimentations.

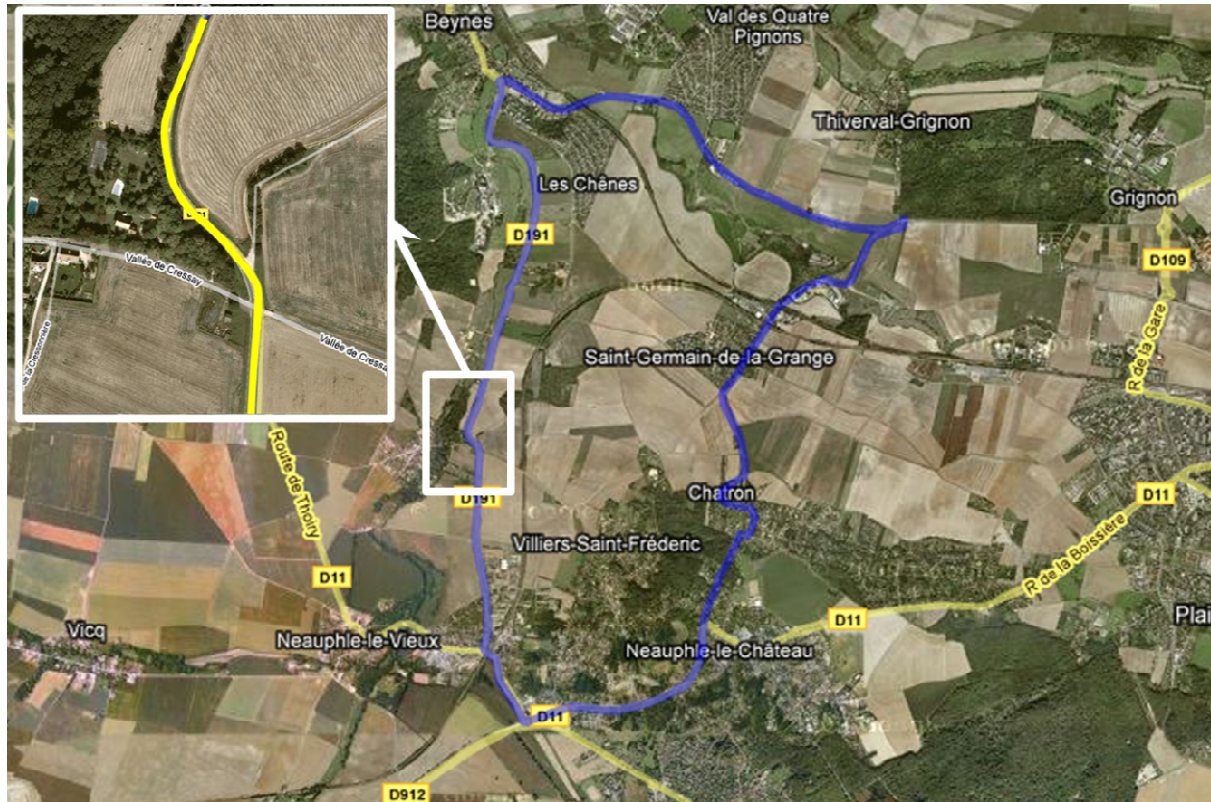


Fig. 4.27 : Piste des expérimentations

Les résultats de l'identification de l'accélération longitudinale sont représentés par la (Fig. 4.28). Elle comprend dans le premier cadre le profil du virage étudié. Dans le deuxième cadre de la figure, nous représentons le tracé de l'accélération longitudinale pratiquée par 5 conducteurs sur la même partie de la trajectoire choisie. Ces résultats montrent en premier temps que les comportements des conducteurs ne sont pas toujours pareils. Chaque conducteur établit une manœuvre, jugée sûre et confortable pour lui-même. Cependant, ces tracés nous permettent d'identifier une valeur moyenne de l'accélération longitudinale autour de laquelle la plupart des conducteurs assure la conduite. La valeur de cette accélération est presque nulle pour une courbure de 3 degrés.

De même, nous avons pu déterminer l'accélération latérale moyenne pratiquée par les conducteurs sur les virages choisis. En effet, pour une courbure de 3 degrés l'accélération latérale moyenne est autour de 10-3 (Fig. 4.28).

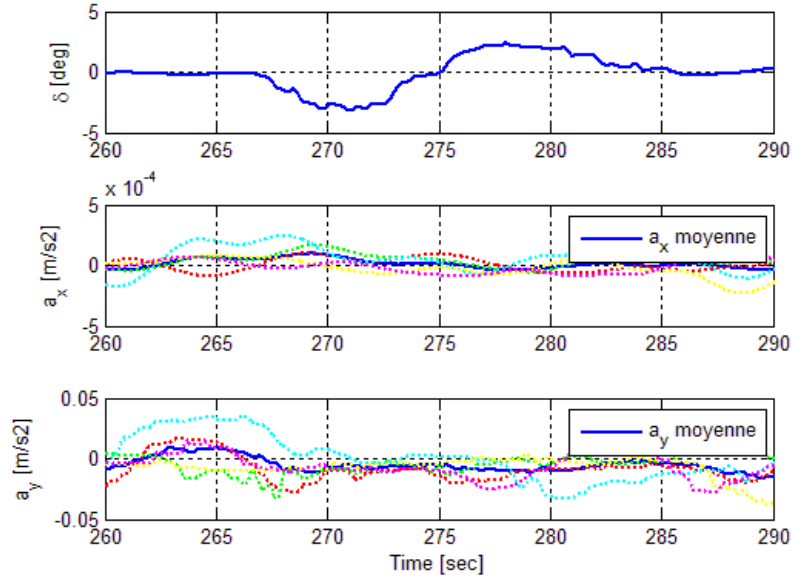


Fig. 4.28 : Accélération longitudinale et latérale pratiquée

Cette étude servira pour déterminer la mobilisation d'adhérence par le conducteur sur la route. Le conducteur ne mobilise qu'une partie de l'adhérence maximale disponible, nous modélisons donc la partie mobilisée par le conducteur par λ_{lon} et λ_{lat} . Ces coefficients serviront par la suite pour qualifier le conducteur et seront injectés dans le système d'alerte pour limiter la vitesse dans le cas nécessaire. La connaissance de ces coefficients est donc possible à partir de la connaissance des accélérations pratiquées par le conducteur. En effet, l'accélération du véhicule ne doit pas dépasser la valeur $\mu_{max}g$, alors pour un μ_{max} égal à 1, nous pourrions déterminer les coefficients λ_{lon} et λ_{lat} en fonction de l'accélération :

$$\lambda_{lon} = \frac{a_x}{g} \quad \text{et} \quad \lambda_{lat} = \frac{a_y}{g} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

6. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter une modélisation simple du système Véhicule-Infrastructure-Conducteur. Cette modélisation est nécessaire pour le travail d'estimation qui aura lieu dans le chapitre suivant. Nous avons donc présenté les interactions entre le conducteur, le véhicule et l'infrastructure, la détermination des perturbations aérodynamiques, les efforts de contact roue-sol, la résistance normale de la chaussée, ainsi que la modélisation du véhicule. Une simple modélisation de l'infrastructure comprenant la définition des trois variables : pente, dévers et courbure, a été présentée. Le conducteur a été modélisé par trois paramètres : le temps de réponse, les accélérations et l'adhérence mobilisée.

Nous verrons dans le chapitre suivant le développement du modèle de véhicule pour l'estimation des variables du véhicule en utilisant le filtre de Kalman déjà présenté dans le chapitre précédent. Cette estimation a pour but principal de déterminer l'angle de dérive du véhicule comme étant un indicateur essentiel de la stabilité du véhicule sur la route.

Nous avons aussi vu l'influence des efforts du vent sur la conduite du véhicule. Nous développerons donc deux méthodes pour prendre en considération ces efforts : la première consiste à estimer ces efforts et les ajouter aux forces longitudinales et latérales. Cette estimation sera présentée dans le chapitre suivant. La deuxième méthode consiste à étudier l'effet de ces efforts sur l'adhérence

disponible sur la route en supposant qu'une partie de cette adhérence sera mobilisée pour les récompenser. Cette approche sera présentée dans le chapitre (7) lors du développement théorique du système d'alerte. Les caractéristiques de l'environnement, l'infrastructure et le conducteur seront aussi utilisées dans ce dernier chapitre.

CHAPITRE 5 : ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU VÉHICULE

1. Introduction

D'après les statistiques en France présentées dans le premier chapitre, les accidents de sorties de route sont généralement les plus fréquents. Prévenir ce type d'accident exige la connaissance de plusieurs paramètres afin d'évaluer le danger de la situation. Certains paramètres (accélération latérale, vitesse de lacet, etc.) sont relativement faciles à mesurer à l'aide de capteurs bas coûts dont la plupart des véhicules récents sont équipés. Ces capteurs sont utilisés dans des systèmes d'assistance à la conduite tels que le système ESP (Programme de Stabilité Electronique). Pourtant, d'autres paramètres tels l'angle de dérive et le coefficient de frottement restent toujours difficiles à mesurer directement à l'aide de capteurs économiques.

L'objectif essentiel de ce chapitre est de répondre à la question portant sur la possibilité d'estimer l'angle de dérive à partir de la connaissance en partie de l'état dynamique du véhicule. Plusieurs travaux ont été déjà effectués afin d'estimer les forces de contact roue/sol et l'angle de dérive. Dans [52], Ray a utilisé le filtre de Kalman étendu (FKE) pour estimer l'état dynamique et les forces de contact roue/sol en utilisant une modèle de véhicule à 9 degrés de libertés. En 2006, Gérard [81] estime les forces roue/sol en utilisant un FKE et un filtre de Kalman Unscented (FKU).

L'estimation de l'angle de dérive a été récemment considérée par Stéphant [57] à l'aide d'un observateur à mode glissant pour un modèle de véhicule bicyclette non linéaire. Dans ce chapitre, une méthodologie d'estimation de l'état du véhicule en utilisant un FKE est considérée. Les forces roue/sol et l'angle de dérive sont ensuite déterminés. Une validation expérimentale sera ensuite présentée afin de valider le fonctionnement en temps réel de l'observateur de l'angle de dérive.

Les efforts du vent ont aussi un effet sur le comportement dynamique du véhicule surtout ceux dus à un vent latéral. La détermination de ces efforts nécessite l'utilisation des capteurs spécifiques qui doivent être embarqués sur le véhicule, ce qui n'est pas disponible actuellement. Une méthode technique qui peut nous permettre de déterminer ces efforts, en utilisant les mesures disponibles par les capteurs déjà embarqués sur le véhicule, est l'estimation. Nous allons donc présenté aussi dans ce chapitre une partie principale sur l'estimation des efforts du vent.

2. Angle de dérive

Le positionnement du véhicule sur le plan de la route est déterminé par trois composantes essentielles : la position du centre de gravité du véhicule définie par deux paramètres x et y dans le

plan de la conduite, et l'angle que fait l'axe longitudinal du véhicule avec le trajet de la route. Le trajet de la route est défini par la direction du vecteur de vitesse d'avancement du véhicule. Dans le cas d'une conduite en ligne droite, la vitesse d'avancement du véhicule et son axe longitudinal ont presque la même direction. Par contre, dans le cas d'un virage, la vitesse du véhicule, étant tangente à la courbure du virage, forme un angle avec la direction longitudinale du véhicule, cet angle est appelé l'angle de dérive latéral du véhicule.

L'objectif principal des systèmes de freinage et de contrôle est de stabiliser le véhicule tout au long du trajet et plus spécifiquement en virage. Quand le véhicule est soumis à des forces transversales, la flexibilité de torsion du pneumatique produit un moment d'auto-alignement qui modifie la direction originale de la roue. La différence entre l'axe longitudinal de la roue et celle de sa vitesse est caractérisée par un angle appelé « angle de dérive du pneumatique » α_i . Cette variation sur la direction de la roue entraîne une variation sur la direction du véhicule. Cette variation est représentée par l'angle formé entre l'axe longitudinal du véhicule et la direction de sa vitesse. Cet angle est appelé « angle de dérive du véhicule » α (Fig. 5.1).

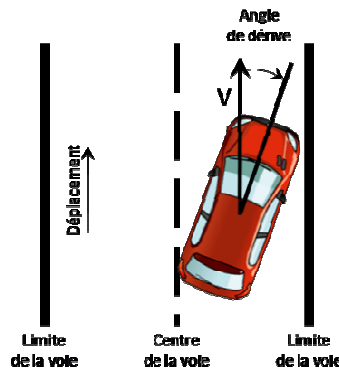


Fig. 5.1 : Angle de dérive

Généralement, les angles de dérive du véhicule β et ceux des roues sont donnés respectivement par les équations suivantes :

$$\beta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$\alpha_i = \delta_i - \tan^{-1} \frac{v_{yi}}{v_{xi}} ; \text{ avec } i = 1,2,3, \quad (\text{Eq. 5.2})$$

v_x et v_y représentent les composantes de la vitesse en longitudinale et latérale, δ_i est l'angle de braquage de chaque roue et v_{xi} et v_{yi} sont les composantes de la vitesse de chaque roue en longitudinal et en latérale.

2.1. Impact de l'angle de dérive sur la stabilité du véhicule

L'angle de dérive est un paramètre important pour la détermination de la stabilité du véhicule [82], et il est donc à l'origine des forces transversales. En effet, si nous pouvons avoir de l'information sur cet angle, cela pourrait être utile pour comprendre le comportement dynamique du véhicule et de détecter les situations critiques telles que le sous et sur virage (Fig. 5.2).

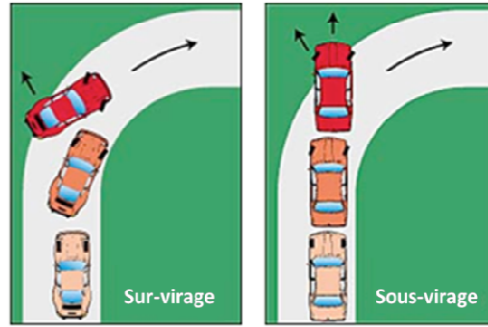


Fig. 5.2 : Phénomène de sur et sous virage

Le sous-virage est une réaction d'un véhicule qui dérape par les roues avant, l'axe médian s'orientant vers l'extérieur du virage (opposé au survirage). Ce phénomène s'explique souvent par une vitesse excessive en entrée de virage ou par une accélération trop précoce en sortie de virage. Dans ce second cas de figure, particulièrement courant sur les tractions avant, la masse du véhicule est alors largement transférée vers l'arrière, ce qui se traduit par une perte d'adhérence des roues avant. Bénéficiant de moins d'appui, ces dernières retranscrivent moins bien le changement de direction et la voiture ne vire pas assez: elle sous-vire car la traction avant perd en adhérence et sort de sa trajectoire optimale vers l'extérieur.

2.2. Calcul de l'angle de dérive pour un modèle de véhicule bicyclette

Modèle cinématique du véhicule :

Sous certaines conditions, on peut développer un modèle cinématique pour étudier le mouvement latéral du véhicule. Ce modèle décrit le comportement du véhicule en négligeant les forces extérieures qui affectent son mouvement.

Considérons donc un modèle bicyclette de véhicule [83], présenté par la (Fig. 5.3). Ce modèle est développé en représentant les deux roues avant (resp. arrière) par un seul roue au point A (resp. B). Supposons que les roues avant et arrière peuvent être dirigées, les angles de braquage de ces roues seront donc déterminés par δ_{av} et δ_{ar} respectivement. Dans le cas inverse, on peut considérer que l'angle de braquage des roues arrière est égal à zéro. Le centre de gravité du véhicule est supposé au point C . Les distances du centre de gravité C aux points A et B sont définies par l_{av} et l_{ar} respectivement.

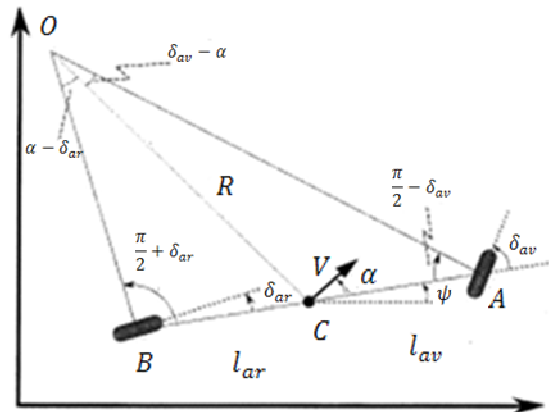


Fig. 5.3 : Modèle cinématique du véhicule

Le mouvement du véhicule est supposé un mouvement plan. La configuration du véhicule est donc déterminée par trois coordonnées : x et y , les positions du centre de gravité du véhicule et l'angle ψ que fait l'axe longitudinal du véhicule avec le repère absolu. La vitesse du véhicule fait un angle α avec l'axe longitudinal du véhicule, c'est l'angle de dérive latéral du véhicule.

Pour étudier ce modèle, on suppose que les vecteurs de vitesses des roues avant et arrière sont portés par les axes longitudinaux des roues. D'une autre manière, on peut dire que l'angle de dérive au niveau des roues est supposé égal à zéro. Cette supposition est valable pour des faibles vitesses, c'est-à-dire inférieures à 5 m/s. Dans ce cas, les forces latérales dues au frottement et générées par les roues sont supposées très faibles.

En se basant sur le modèle présenté par la (Fig. 5.3), on peut appliquer la formule des *sinus* sur le triangle OCA :

$$\frac{\sin(\delta_{av}-\alpha)}{l_{av}} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2}-\delta_{av})}{R} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Identiquement, on peut appliquer la formule des *sinus* sur le triangle OCB :

$$\frac{\sin(\alpha-\delta_{ar})}{l_{ar}} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2}+\delta_{ar})}{R} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

À partir des équations (Eq. 5.3) et (Eq. 5.4) on peut écrire :

$$\frac{\sin(\delta_{av}) \cos(\alpha) - \sin(\alpha) \cos(\delta_{av})}{l_{av}} = \frac{\cos(\delta_{av})}{R} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

$$\frac{\cos(\delta_{ar}) \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \sin(\delta_{ar})}{l_{ar}} = \frac{\cos(\delta_{ar})}{R} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

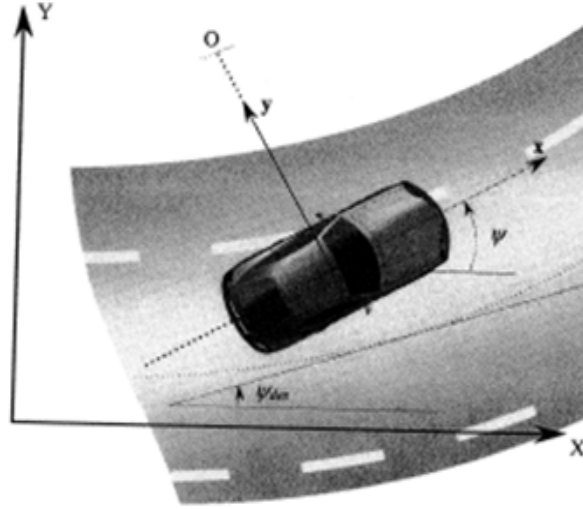
Multiplions les équations (Eq. 5.5) et (Eq. 5.6) par $\frac{l_{av}}{\cos(\delta_{av})}$ et $\frac{l_{ar}}{\cos(\delta_{ar})}$ respectivement, on obtient :

$$\tan(\delta_{av}) \cos(\alpha) - \sin(\alpha) = \frac{l_{av}}{R} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

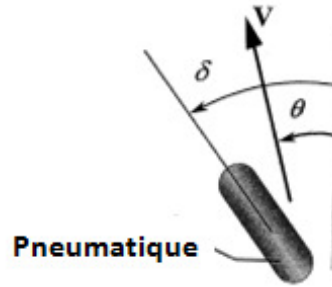
$$\sin(\alpha) - \tan(\delta_{ar}) \cos(\alpha) = \frac{l_{ar}}{R} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

L'angle de dérive du véhicule peut alors être obtenu en multipliant les équations (Eq. 5.7) et (Eq. 5.8) par l_{ar} et l_{av} respectivement :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{l_{av} \tan(\delta_{ar}) + l_{ar} \tan(\delta_{av})}{l_{av} + l_{ar}} \right) \quad (\text{Eq. 5.9})$$

Modèle dynamique du véhicule :

Fig. 5.4 : Modèle dynamique du véhicule

Quand le véhicule roule à des vitesses élevées, la supposition établie dans le paragraphe ci-dessus ne peut plus être valable. La vitesse élevée entraîne des forces transversales non négligeables au niveau des roues. Dans ce cas, un modèle dynamique de véhicule est développé [83] (Fig. 5.4).


Fig. 5.5 : Angle de dérive de la roue

On s'intéresse ici à déterminer l'angle de dérive de chaque roue. Cet angle a été déjà défini comme l'angle entre l'orientation du pneu et l'orientation du vecteur de vitesse de la roue. D'après la (Fig. 5.5), on peut définir l'angle de dérive au niveau des roues avant par :

$$\alpha_{av} = \delta - \theta_{av} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Où θ_{av} est l'angle que fait le vecteur de vitesse avec l'axe longitudinal du véhicule et δ l'angle de braquage. L'angle de dérive des roues arrière est défini en supposant que l'angle de braquage arrière est nul :

$$\alpha_{ar} = -\theta_{ar} \quad (\text{Eq. 5.11})$$

Les angles θ_{av} et θ_{ar} sont déterminés par les relations suivantes :

$$\tan(\theta_{av}) = \frac{v_y + l_{av}\dot{\psi}}{v_x} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

$$\tan(\theta_{ar}) = \frac{v_y + l_{ar}\dot{\psi}}{v_x} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

Ainsi, les angles de dérive à l'avant et l'arrière sont donnés par :

$$\alpha_{av} = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{v_y + l_{av} \dot{\psi}}{v_x} \right) \quad (\text{Eq. 5.14})$$

$$\alpha_{ar} = -\tan^{-1} \left(\frac{v_y + l_{ar} \dot{\psi}}{v_x} \right) \quad (\text{Eq. 5.15})$$

2.3. Phénomène de sous et sur virage

À l'équilibre, le principe fondamental de la statique nous permet d'établir les équations d'équilibre des forces et des moments du modèle bicyclette développé, sous la forme suivante :

$$F_{yav} + F_{yar} = m \frac{v_x^2}{R} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

$$F_{yav} l_{av} - F_{yar} l_{ar} = 0 \quad (\text{Eq. 5.17})$$

Les forces latérales des roues avant et arrière sont alors écrites sous la forme :

$$F_{yav} = m \frac{l_{ar}}{L} \frac{v_x^2}{R} = m_{av} \frac{v_x^2}{R} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

$$F_{yar} = m \frac{l_{av}}{L} \frac{v_x^2}{R} = m_{ar} \frac{v_x^2}{R} \quad (\text{Eq. 5.19})$$

Où :

$$L = l_{av} + l_{ar} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

Admettons que les angles de dérive des roues sont faibles, les forces latérales peuvent être considérées proportionnelles à ces angles, et donc on peut écrire :

$$\alpha_{av} = \frac{F_{yav}}{2C_{\alpha av}} = \frac{m_{av}}{2C_{\alpha av}} \frac{v_x^2}{R} \quad (\text{Eq. 5.21})$$

$$\alpha_{ar} = \frac{F_{yar}}{2C_{\alpha ar}} = \frac{m_{ar}}{2C_{\alpha ar}} \frac{v_x^2}{R} \quad (\text{Eq. 5.22})$$

Où : $C_{\alpha av}$ et $C_{\alpha ar}$ sont les raideurs de pneumatiques avant et arrière respectivement.

À partir des équations (Eq. 5.21) et (Eq. 5.22), on peut définir le gradient de sous-virage par :

$$K_V = \frac{m_{av}}{2C_{\alpha av}} - \frac{m_{ar}}{2C_{\alpha ar}} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

La valeur de ce gradient dépend des raideurs des pneumatiques et de la masse du véhicule. Ce gradient permet de décrire l'état du véhicule du point de vue de la stabilité. Trois états peuvent être identifiés :

- Véhicule stable : c'est le cas d'un gradient de sous-virage K_V nul. Cela est dû à des angles de dérive avant et arrière égaux.

$$\frac{m_{av}}{C_{\alpha av}} = \frac{m_{ar}}{C_{\alpha ar}} \Rightarrow K_V = 0 \Rightarrow \alpha_{av} = \alpha_{ar}$$

- Véhicule en sous-virage : c'est le cas d'un gradient positif. Cela est dû à un angle de dérive à l'avant supérieur de celui à l'arrière.

$$\frac{m_{av}}{C_{\alpha av}} > \frac{m_{ar}}{C_{\alpha ar}} \Rightarrow K_V > 0 \Rightarrow \alpha_{av} > \alpha_{ar}$$

- Véhicule en survirage : c'est le cas d'un gradient négatif. Cela est dû à un angle de dérive à l'avant inférieur de celui à l'arrière.

$$\frac{m_{av}}{C_{\alpha av}} < \frac{m_{ar}}{C_{\alpha ar}} \Rightarrow K_V < 0 \Rightarrow \alpha_{av} < \alpha_{ar}$$

2.4. Méthode d'estimation de l'angle de dérive

Pour mesurer l'angle de dérive nous avons besoin d'un capteur approprié : c'est le « Correvit ». Cependant, l'utilisation de ce type de capteur pourrait représenter un coût inacceptable pour les constructeurs d'automobiles. En conséquence, il doit être déterminé par d'autres méthodes plus pratiques et simples : l'estimation. La question qui se pose ainsi est comment estimer cet angle ?

L'estimation est représentée par le schéma de la (Fig. 5.6). Elle se fait en trois étapes principales : la mesure (capteurs), la modélisation du véhicule et l'estimation en utilisant un algorithme bien choisi. L'étape de mesure consiste à collecter les mesures nécessaires pour l'estimation. Trois capteurs sont utilisés : un ABS, une Centrale Inertielle et un Codeur Optique. Les mesures sont par la suite introduites dans le modèle de véhicule, premièrement pour calculer les forces normales et deuxièmement dans une boucle entre l'estimation des forces roue/sol et l'état dynamique du véhicule. Une fois que l'estimation est faite, nous pouvons utiliser les résultats pour déterminer l'angle de dérive ainsi que d'autres paramètres et variables importantes pour comprendre le comportement dynamique du véhicule.

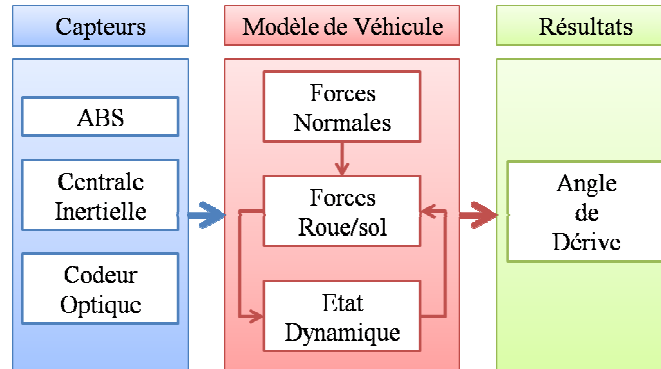


Fig. 5.6 : Méthode d'estimation

Les capteurs utilisés dans ce travail ont été présentés dans le chapitre précédent. Nous présentons alors dans le paragraphe suivant le modèle détaillé dans le chapitre (4) et sa validation en fonction des mesures réelles issues des expérimentations faites sur les véhicules d'essai du LIVIC.

3. Estimation des efforts du vent

Le vent étant un élément perturbateur à la conduite, nous voulons donc estimer les forces et les moments induits par le vent. Pour cela, nous supposons disposer des mesures de la vitesse de lacet r , l'écart latéral y_l et l'erreur en angle de cap ψ_l , ainsi que le braquage et la vitesse d'avancement.

3.1. Modèle pour l'observation

Pour l'observateur, nous utilisons un modèle à deux roues, bicyclette, avec un contact pneumatique-chaussée linéaire. Il est étendu avec les variables d'écart latéral et d'erreur de cap, donc $x = [\beta, r, y, \Delta\psi]^T$. Les forces et moments induits par le vent sont introduits sous la forme d'une entrée $W = [F_w, M_w]^T$. Les équations de ce modèle sont :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_w W \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.24})$$

Avec,

$$A = \begin{bmatrix} -2\frac{C_f + C_r}{MV} & -1 + \frac{2L_r C_r - 2L_f C_f}{MV} & 0 & 0 \\ \frac{2L_r C_r - 2L_f C_f}{I_z} & -\frac{2L_r^2 C_r + 2L_f^2 C_f}{I_z V} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2\frac{C_f}{MV} \\ 2\frac{C_f}{I_z} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{MV} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_z} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L'état est étendu pour intégrer les forces et les moments générés par le vent. Nous obtenons le système :

$$\begin{cases} \dot{X} = \hat{A}X + \hat{B}u \\ Y = \hat{C}X \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.25})$$

Où,

$$A = \begin{bmatrix} A & B_w \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [C \quad 0]$$

Finalement, nous avons l'état estimé $\hat{X}$ et le système :

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = \hat{A}\hat{X} + \hat{B}u + M(\hat{Y} - Y) \\ \hat{Y} = \hat{C}\hat{X} \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.26})$$

En faisant la différence entre les deux systèmes, nous pouvons exprimer l'erreur $e = \hat{X} - X$ en fonction des paramètres du système :

$$\dot{e} = (A + MC)e \quad (\text{Eq. 5.27})$$

Nous pouvons donc nous assurer de la convergence de l'erreur vers 0 en fonction de M . Le fonctionnement de l'observateur est résumé dans la (Fig. 5.7).

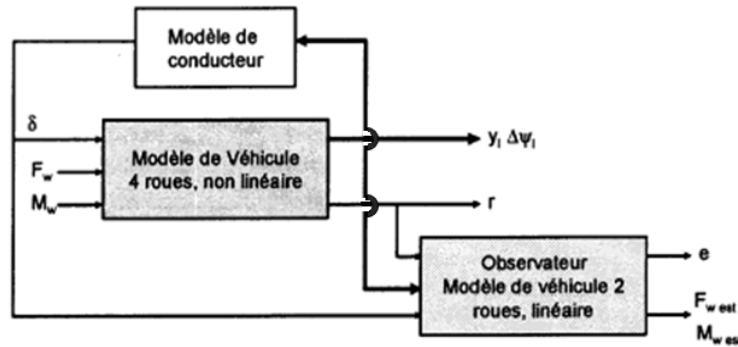


Fig. 5.7 : Schéma de l'observateur général

3.2. Observabilité et problème numérique

L'observabilité du système représenté par l'équation (Eq. 5.26) a été vérifiée en calculant le rang de la matrice d'observabilité qui est de 6. Le système est donc théoriquement observable. Néanmoins, du point de vue numérique, le système est extrêmement mal conditionné. En effet, la valeur propre la plus petite est de l'ordre de 10^{-6} contre 10^5 la plus élevée. L'observation simultanée de la force et du moment n'est pas numériquement possible. Par contre, du fait de la mesure directe de la vitesse de lacet, l'observation du moment induit par le vent latéral est réalisable, comme montré sur la (Fig. 5.8).

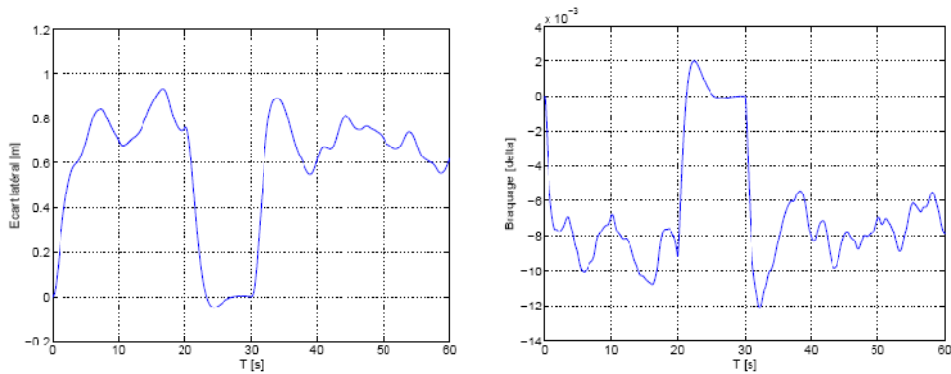


Fig. 5.8 : Observation simultanée de la force et du moment induit par le vent

3.3. Estimation des forces et moments par deux observateurs

Étant donné que l'observation de la force et du moment induits par le vent est théoriquement possible et que l'estimation du moment est numériquement possible, deux observateurs ont été créés pour estimer la force et le moment induits par le vent.

Le premier observateur est utilisé pour estimer le moment de lacet induit par le vent et utilise en entrée le braquage et la vitesse de lacet. L'observabilité d'un tel système est démontrable par la méthode exposée précédemment. Le moment estimé est alors injecté dans le deuxième observateur qui reprend les mêmes entrées que le précédent, ainsi que l'écart latéral et l'erreur en angle de cap. La (Fig. 5.9) résume ce double observateur.

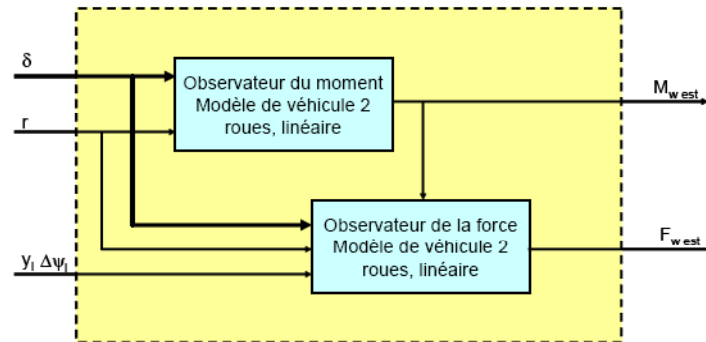


Fig. 5.9 : Estimation de la force et du moment par deux observateurs

Les résultats de cet observateur sont concluants. Sur la (Fig. 5.10) l'erreur commise sur l'estimation du moment est faible : elle reste inférieure à 300Nm pour des valeurs du moment variant entre 2KNm et 5KNm. L'erreur commise sur la force est plus importante, et surtout, le retard est de l'ordre de 1s. Nous ne pouvons pas contraindre plus l'observateur, le système deviendrait rapidement instable. Ces efforts estimés seront ensuite introduits dans le modèle de véhicule utilisé pour l'estimation de l'angle de dérive.

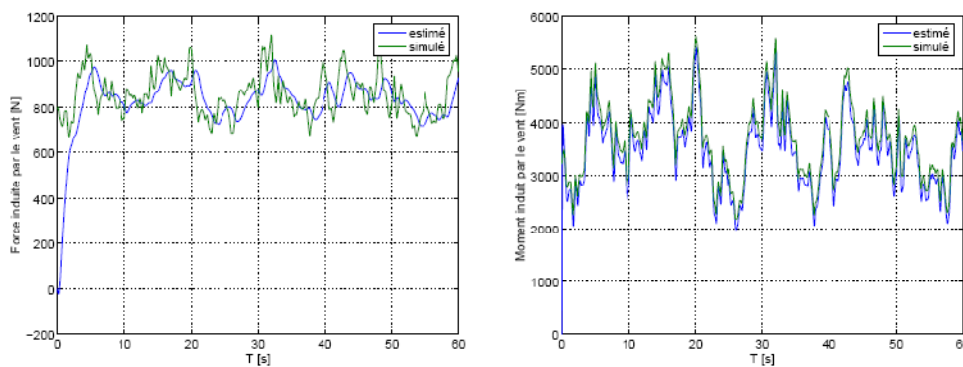


Fig. 5.10 : Observation de la force et du moment induit par le vent latéral

4. Modèle de véhicule - Validation en temps réel

Le modèle utilisé pour l'estimation de l'angle de dérive est celui présenté dans le chapitre (4) (Fig. 5.11). C'est le modèle de véhicule à quatre roues [18].

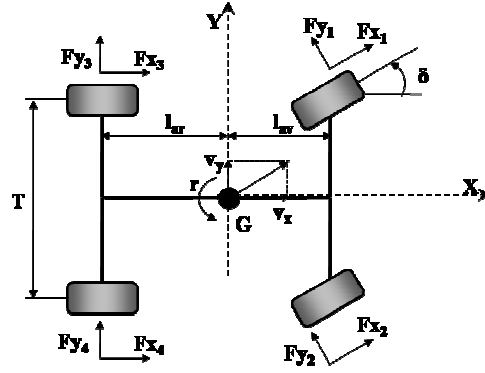


Fig. 5.11 : Modèle de véhicule à quatre roues

C'est un modèle de véhicule non linéaire simplifié qui considère les forces roue/sol. Le mouvement dynamique du véhicule est modélisé par trois équations qui représentent respectivement le mouvement de translation longitudinale, le mouvement de translation latérale et le mouvement de rotation autour de l'axe vertical (mouvement de lacet).

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \frac{1}{m} \sum F_{xi} + F_{x,vent} + \psi v_y \\ \dot{v}_y = \frac{1}{m} \sum F_{yi} + F_{y,vent} - \dot{\psi} v_x \\ \dot{\psi} = \frac{1}{I_z} \sum M_{zi} \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.28})$$

L'état dynamique est représenté par un vecteur composé de trois paramètres essentiels : la vitesse longitudinale v_x , la vitesse latérale v_y et l'angle de lacet ψ . I_z étant le moment d'inertie suivant l'axe vertical. F_{xi} , F_{yi} et M_{zi} sont respectivement les forces roue/sol longitudinales, latérales, et le moment autour de l'axe $\vec{z}$ ($i = 1 \dots 4$ représente les quatre roues du véhicule). $F_{x,vent}$ et $F_{y,vent}$ représentent les composantes de la force aérodynamique suivant les deux axes $\vec{x}$ et $\vec{y}$.

4.1. Modèle des forces d'interaction roue-sol

Le système précédent exige l'utilisation d'un modèle de contact roue/sol. Plusieurs modèles existent dans la littérature [75], [78], [76] et [77]. En se référant à l'étude comparative entre certains de ces modèles, nous choisissons le modèle Dugoff dans cette estimation et cela pour deux raisons principales : il recommande un nombre réduit de paramètres pour évaluer les forces pneumatique/chaussée, et sa formulation reste toujours proche de la formulation linéaire. Les forces sont alors données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} F_{lon} = C_x \frac{\tau}{1-\tau} \kappa \\ F_{lat} = C_y \frac{\tan \alpha}{1-\tau} \kappa \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.29})$$

Avec :

$$\kappa = \begin{cases} (2 - \sigma)\sigma, & \sigma < 1 \\ 1, & \sigma \geq 1 \end{cases}$$

Où :

$$\sigma = \frac{(1-\tau)\mu F_n}{2\sqrt{C_x^2\tau^2 + C_y^2\tan^2\alpha}} \quad (\text{Eq. 5.30})$$

L'utilisation du modèle Dugoff pour calculer les forces pneumatique/chaussée afin d'estimer l'état dynamique du véhicule, nécessite la connaissance des forces normales appliquées sur chaque roue du véhicule. Ces forces sont fonction de la masse du véhicule, et leur distribution dépend de certains paramètres et dimensions. Ces forces ont été présentées dans le chapitre (4) sous la forme :

$$\begin{cases} F_{n1} = \frac{l_{ar}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{l_{ar}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \\ F_{n2} = \frac{l_{ar}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{l_{ar}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \\ F_{n3} = \frac{l_{av}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} - \frac{l_{av}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \\ F_{n4} = \frac{l_{av}mg}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{hma_x}{2(l_{ar}+l_{av})} + \frac{l_{av}hma_y}{(l_{ar}+l_{av})S_b} \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.31})$$

4.2. Validation

Avant l'utilisation du modèle de véhicule développé précédemment afin d'estimer l'angle de dérive ainsi que d'autres variables (les forces de contact, le coefficient de frottement, etc.), une validation réelle est mise en œuvre pour comparer les résultats obtenus par le modèle aux mesures réelles déterminées à l'aide d'un véhicule de test, équipé, du LIVIC et roulant sur la piste d'essai de Satory à Versailles en France. Les caractéristiques réelles du véhicule d'essai ont été introduites dans le modèle. Les valeurs numériques de ces caractéristiques sont présentées par le tableau suivant :

m	Masse du véhicule	1550	Kg
h	Hauteur du centre de gravité (CG)	0.5	m
l_{av}	Distance entre le CG et l'essieu avant	1.0065	m
l_{ar}	Distance entre le CG et l'essieu arrière	1.4625	m
S_b	Longueur de l'essieu	1.5	m
g	Accélération gravitationnelle	9.81	m/s ²
I_z	Moment d'inertie	2200	Kgm ²
R	Rayon du pneumatique	0.306	m
μ	Coefficient de frottement	0.8	--
C_{xxi}	Raideur longitudinal du pneumatique	30000	N
C_{yyi}	Raideur latéral du pneumatique	57000	N

Tab. 5.1 : Caractéristiques du véhicule d'essai

Le modèle peut être décrit fonctionnellement par le bloc diagramme présenté par la (Fig. 5.12). Le vecteur d'entrée comprend l'angle de braquage et les quatre vitesses de rotation des roues, mesurées respectivement par un codeur optique et un ABS. La sortie du modèle est le vecteur d'état et les forces longitudinales et latérales.

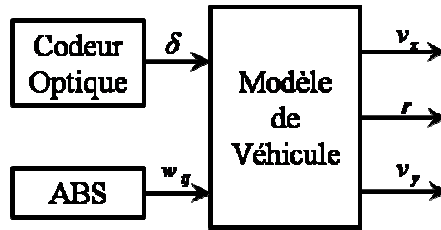


Fig. 5.12 : Bloc diagramme de la simulation

En suivant le bloc diagramme de la (Fig. 5.12), nous simulons le modèle sur la partie choisie de la piste de Satory. L'état dynamique ainsi obtenu de la simulation du modèle est ensuite comparé aux mesures réelles collectées à l'aide du véhicule prototype. La (Fig. 5.13) montre le braquage suivi sur la piste ainsi que l'état dynamique obtenu comparé aux mesures. Sur cette figure, nous remarquons que les deux courbes, simulée et mesurée, se suivent complètement. De plus, pour bien vérifier cette bonne simulation, nous présentons dans le (Tab. 5.12) les erreurs commises au niveau de cette simulation.

Caractéristique	Formule	Valeur		
		v_x	v_y	$\dot{\psi}$
Erreur (Err)	$x_m - \hat{x}$	[...]	[...]	[...]
Erreur Moyenne Relative	$\frac{\text{Moy}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	0.002	0.0261	0.0093
Erreur Maximale Relative	$\frac{\text{Max}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	0.022	0.3309	0.444
Ecart Type	$\text{Moy}(Err^2) - (\text{Moy}(Err))^2$	0.012	0.0016	0.0014
x_m : vecteur mesure $\hat{x}$: vecteur estimation				

Tab. 5.2 : Erreur de la simulation de l'état dynamique

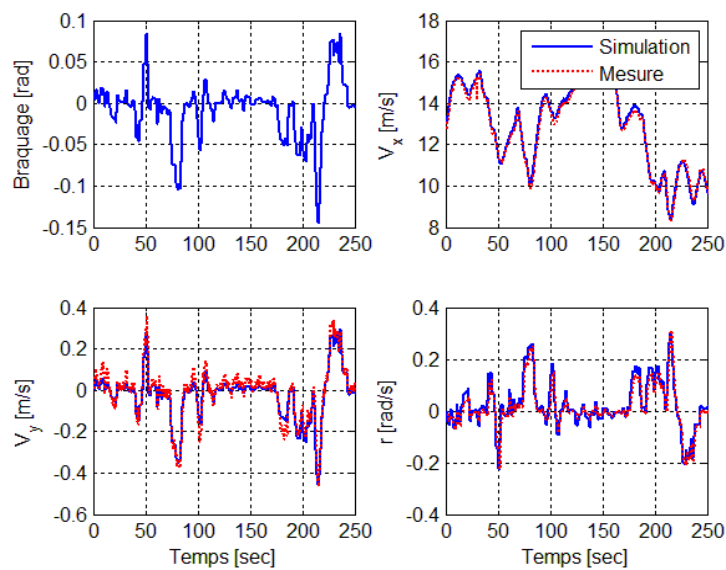


Fig. 5.13 : Simulation de l'état dynamique

Les figures (Fig. 5.14), (Fig. 5.15), et (Fig. 5.16) représentent aussi la réponse du véhicule au niveau des points de contact pneumatique/chaussée par des forces longitudinales, latérales et normales.

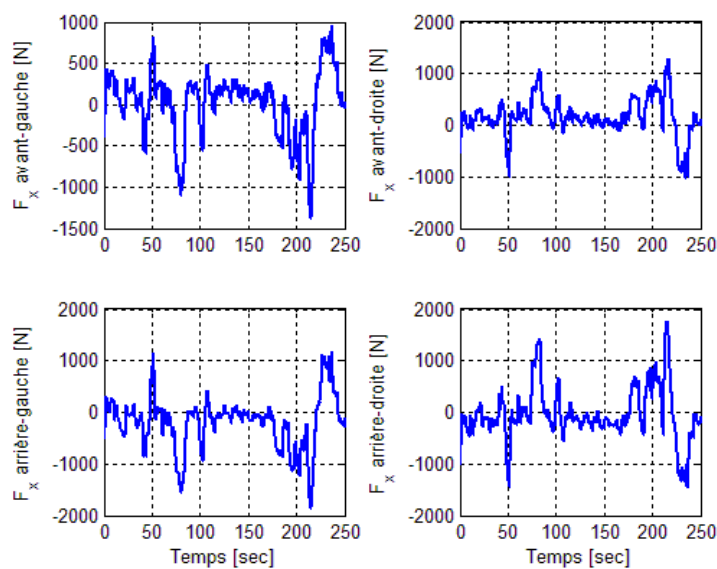


Fig. 5.14 : Simulation des forces longitudinales

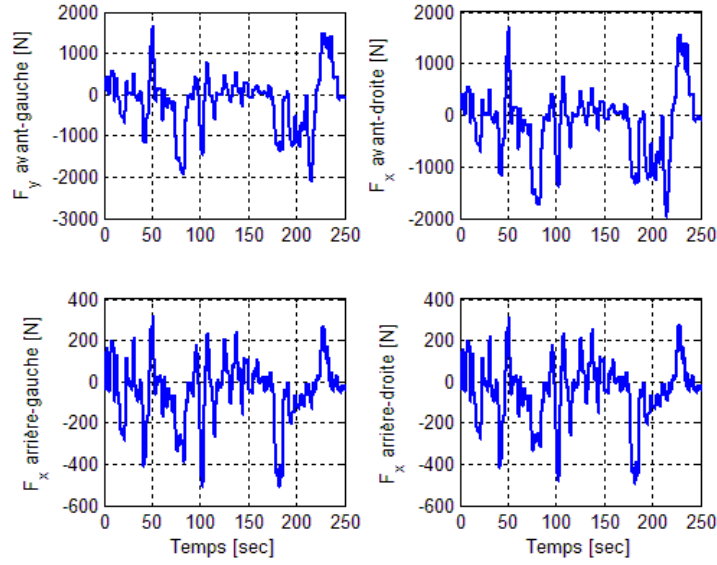


Fig. 5.15 : Simulation des forces latérales

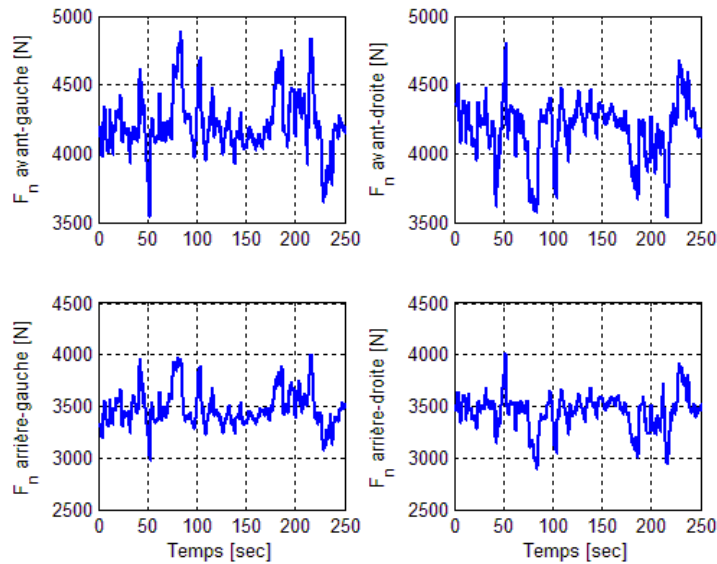


Fig. 5.16 : Simulation des forces normales

Ces simulations prouvent, de plus, que le modèle mathématique développé fournit une bonne description de l'évolution dynamique réelle du véhicule. Ainsi, ce modèle peut être utilisé pour l'estimation de l'état dynamique et l'évaluation du coefficient de frottement et l'angle de dérive.

5. Estimation

Plusieurs méthodes d'estimation existent dans la littérature. Ces méthodes peuvent être classées selon le type de modèle utilisé et l'application désirée. Une étude détaillée a été présentée dans le chapitre (3) sur ces différentes méthodes existantes ainsi que les différentes applications correspondantes. En se basant sur cette étude, nous pouvons choisir entre le filtre de Kalman unscented et le filtre de Kalman étendu comme méthode pour notre application puisque le modèle du véhicule est simple mais non linéaire. Or comme nous visons faire une validation expérimentale du

système, nous préférons d'utiliser le filtre de Kalman étendu pour la simplicité de son implémentation.

L'estimation de l'état dynamique du véhicule nécessite des mesures qui doivent être utilisées pour garantir une bonne estimation. Le choix des mesures est très important mais aussi complexe à la fois. Les mesures doivent être choisies, d'une part, d'une façon permettant d'obtenir des résultats d'estimation, meilleures (erreur minimale), et d'autre part, il faut noter une attention significative aux capteurs utilisés pour déterminer ces mesures. Parfois, les mesures désirées sont déterminées par des capteurs très onéreux, qui ne peuvent pas être mis en œuvre sur un véhicule commercial. Pour cette raison, nous devons établir un compromis entre le choix des mesures d'une part et le prix des capteurs d'autre part. Les mesures ainsi considérées pour notre étude sont les suivantes :

- Vitesse de lacet, accélérations longitudinale et latérale mesurées par une centrale inertielle.
- Vitesse de rotation de chaque pneumatique fournie par un ABS.
- Angle de braquage mesuré par un codeur optique.

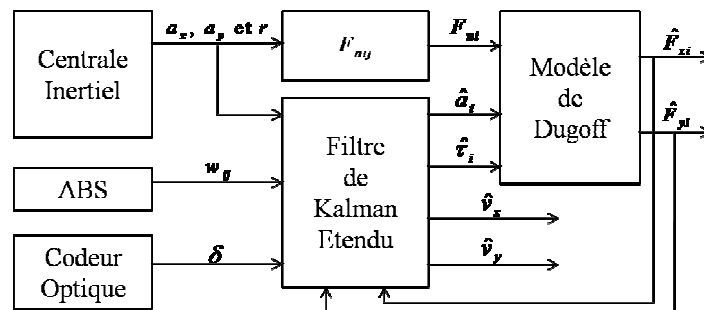


Fig. 5.17 : Bloc diagramme de l'estimation

Le schéma de l'estimation est représenté par le bloc diagramme de la (Fig. 5.17). Dans cette figure, nous remarquons qu'on utilise trois capteurs, la centrale inertielle, le capteur de vitesse inductif et le codeur optique. Ces capteurs mesurent respectivement les accélérations, la vitesse de rotation des quatre roues et l'angle de braquage. Dans cette figure, nous présentons la boucle dans laquelle l'estimation se déroule. Les mesures de la centrale inertielle sont utilisées pour calculer les forces normales appliquées à chaque pneumatique. Par la suite, toutes les mesures seront utilisées comme entrées pour le filtre FKE afin d'estimer l'état dynamique, les forces pneumatique/chaussée et l'angle de dérive à l'instant k en utilisant les forces estimées à l'instant $k - 1$.

5.1. Filtre de Kalman Etendu

Le filtre de Kalman étendu (FKE) est dédié pour l'estimation du vecteur d'état des systèmes non linéaires [34]. [68] et [69]. Afin de développer directement un filtre de Kalman discret, le modèle dynamique du véhicule doit être discrétisé. Cette discrétisation est faite par une approximation d'Euler. Nous obtenons alors un système non linéaire discret de la forme suivante :

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k) + g(x_k, u_k) + b_k \\ y_k = h(x_k) + w_k \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.32})$$

b_k et w_k sont les bruits de la dynamique et des mesures respectivement. Ces bruits sont supposés blancs gaussiens de moyennes nulles et de covariances respectives Q_k et R_k connues. Ils sont supposés mutuellement indépendants et indépendants de la condition initiale. Une étude plus détaillée sur le filtre de Kalman a été présentée dans le chapitre (5).

5.2. Etude d'observabilité

Pour garantir que l'état est observable en utilisant les mesures choisies ci-dessus, une étude d'observabilité permet de démontrer que notre système est observable. Le critère d'observabilité est basé sur la détermination du rang de la matrice d'observabilité Ob qui doit être égal à la dimension du vecteur d'état (dans notre cas, le rang doit être égal à 3).

Cette étude d'observabilité est simple à appliquer sur un système linéaire, mais elle est plus complexe pour un système non linéaire où l'on peut utiliser la dérivée de Lie pour savoir si le système est observable ou non. La dérivée de Lie n'est pas aussi simple pour l'appliquer sur certains systèmes complexes non linéaires ou les calculs des dérivées ne sont pas si faciles à effectuer. C'est pourquoi nous utilisons la méthode de la tangente linéaire permettant de déterminer l'observabilité du système à chaque instant d'échantillonnage. La dérivée de Lie est donnée par l'équation :

$$L_f h(x) = \sum_{i=1}^n \frac{dh}{dx_i} f_i(x) = \frac{dh}{dx} f(x) \quad (\text{Eq. 5.33})$$

Où,

$$L_f^k h(x) = L_f (L_f^{k-1} h(x)) \quad \text{avec} \quad L_f^0 h(x) = h(x)$$

La matrice d'observabilité pour les systèmes non linéaires est donnée par :

$$Ob = [dh \quad dL_f h \quad dL_f^2 h \quad \dots]^T \quad (\text{Eq. 5.34})$$

En utilisant la méthode de la tangente linéaire, la matrice d'observabilité pour un vecteur de trois états est donnée par :

$$Ob = [C \quad CA \quad CA^2]^T \quad (\text{Eq. 5.35})$$

Où C est la matrice des mesures donnée par :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A étant la linéarisation de la fonction d'évolution f du système utilisé (S) autour de l'état estimé à chaque instant d'échantillonnage. (S) étant le système suivant :

$$(S): f = \begin{cases} f_1 = \frac{1}{m} \sum F_{xi} + \dot{\psi} v_y \\ f_2 = \frac{1}{m} \sum F_{yi} - \dot{\psi} v_x \\ f_3 = \frac{1}{I_z} \sum M_{zi} \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.36})$$

A sera donc de la forme :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v_x} & \frac{\partial f_1}{\partial v_y} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\psi}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial v_x} & \frac{\partial f_2}{\partial v_y} & \frac{\partial f_2}{\partial \dot{\psi}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial v_x} & \frac{\partial f_3}{\partial v_y} & \frac{\partial f_3}{\partial \dot{\psi}} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5.37})$$

Une étude d'observabilité est faite sur notre modèle à chaque instant de l'échantillonnage. Le rang de la matrice d'observation a été calculé et était égal à 3. Une telle étude assure que l'observabilité au vecteur d'état estimé et non pas celui réel. Afin d'avoir une étude d'observabilité plus large, nous étudions l'observabilité sur un espace autour de la valeur estimée. Pour le système considéré, l'espace observée est de 10^{-3} d'erreur pour la vitesse latérale et celle de lacet, et de 10% pour la vitesse longitudinale.

5.3. Validation du filtre de Kalman

Après avoir tout définir pour estimer l'état dynamique du véhicule et aussi l'angle de dérive qui est le paramètre le plus important dans notre étude, nous pouvons passer à l'estimation. Par contre, il est plus important de valider le fonctionnement du filtre de Kalman sur une simple trajectoire bien définie. Nous utilisons la même trajectoire étudiée dans le chapitre (4) pour valider le modèle du véhicule. Cette trajectoire et son braquage sont présentés par la (Fig. 5.18). Cependant, pour solliciter la dynamique du système, nous avons ajouté un bruit gaussien sur les mesures et les variables d'entrée.

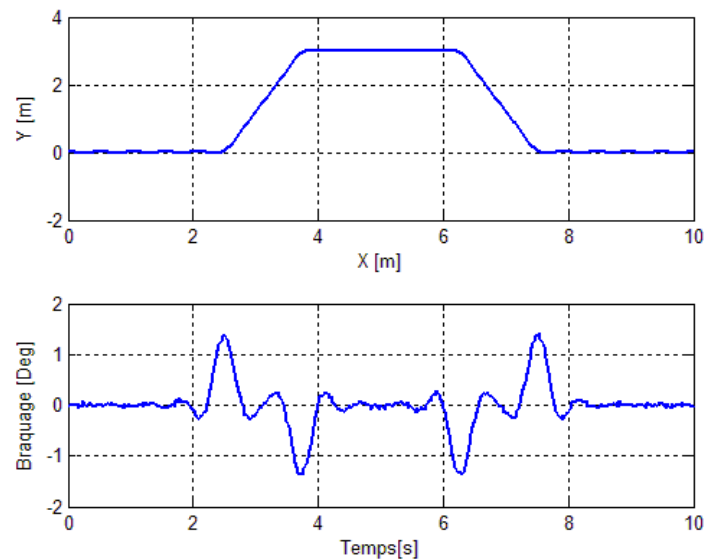


Fig. 5.18 : Trajectoire et braquage de validation

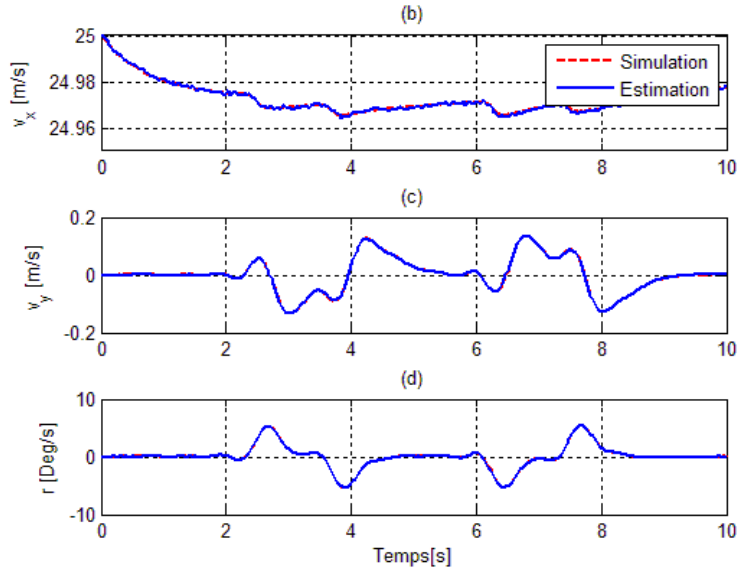


Fig. 5.19 : Estimation de l'état dynamique

Les résultats de l'estimation de l'état dynamique par le filtre de Kalman sont présentés par la (Fig. 5.19). Sur cette figure, nous remarquons une comparaison entre l'état simulé et celui estimé. Les deux courbes se suivent fidèlement. Les valeurs des erreurs présentées dans le (Tab. 5.3) montrent que nous avons une très bonne estimation.

Caractéristique	Formule	Valeur		
		v_x	v_y	$\dot{\psi}$
Erreur (Err)	$x_m - \hat{x}$	[...]	[...]	[...]
Erreur Moyenne Relative	$\frac{\text{Moy}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	5×10^{-7}	0.133×10^{-3}	0.066×10^{-3}
Erreur Maximale Relative	$\frac{\text{Max}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	1×10^{-4}	0.0171	0.025
Ecart Type	$\text{Moy}(Err^2) - (\text{Moy}(Err))^2$	0.234×10^{-6}	0.5421×10^{-6}	0.7903×10^{-6}
x_m : vecteur mesure				
$\hat{x}$: vecteur estimation				

Tab. 5.3 : Erreur de la validation de l'estimation de l'état dynamique

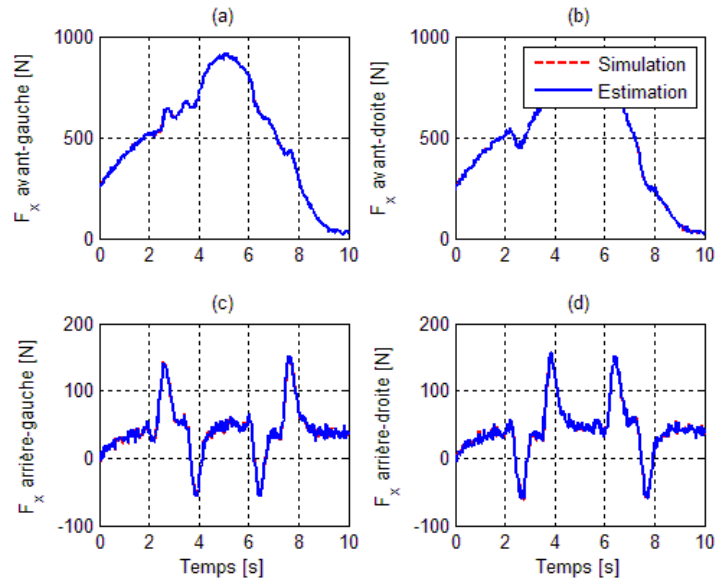


Fig. 5.20 : Estimation des forces longitudinales

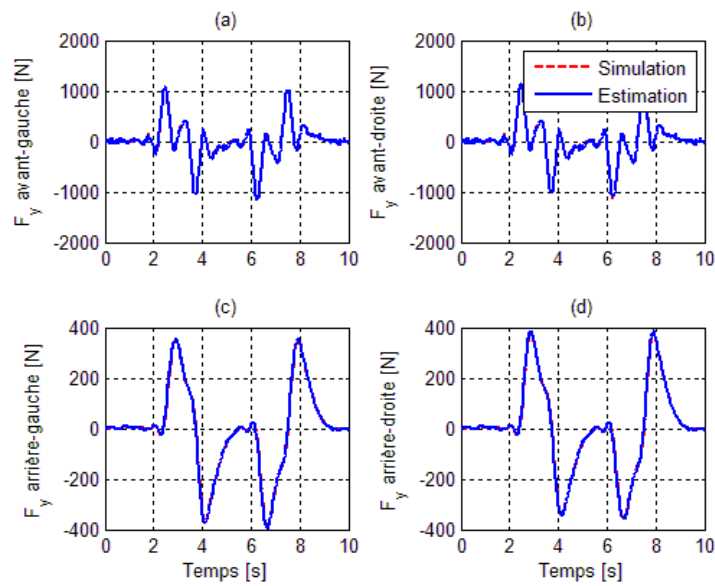


Fig. 5.21 : Estimation des forces latérales

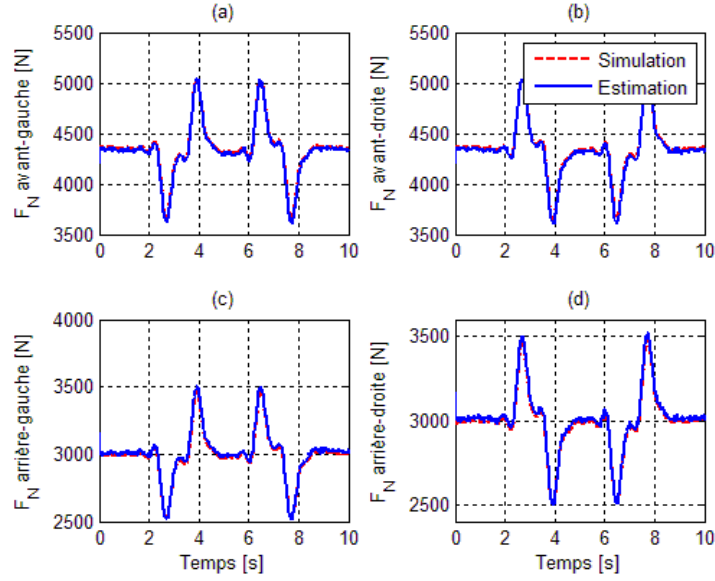


Fig. 5.22 : Estimation des forces normales

Les figures (Fig. 5.20), (Fig. 5.21), et (Fig. 5.22) montrent les résultats de l'estimation des forces de contact roue/sol longitudinales, latérales et normales. Nous avons aussi une faible erreur d'estimation entre les forces simulées et celles estimées.

5.4. Estimation de l'état dynamique

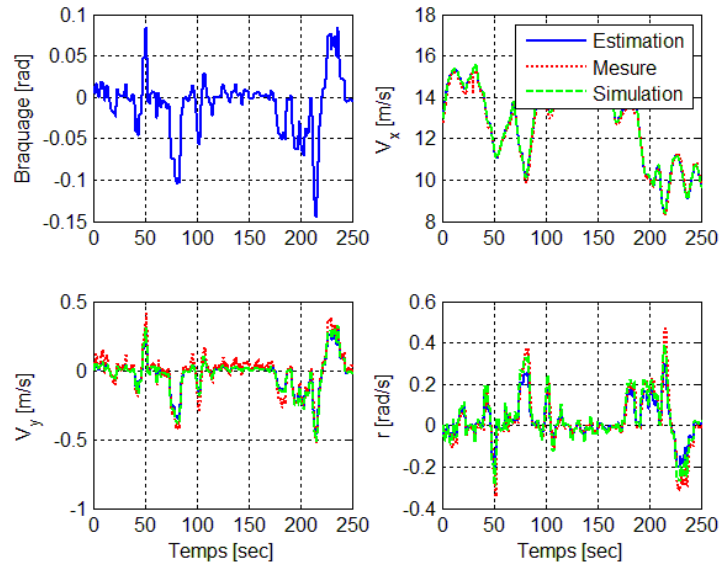


Fig. 5.23 : Estimation de l'état dynamique

La validation du filtre de Kalman présentée dans le paragraphe précédent, nous permet de passer à l'estimation de l'état en utilisant les données issues du véhicule prototype et de comparer les résultats de l'estimation avec des mesures collectées sur la piste de Satory. Les résultats de l'estimation de l'état dynamique sont représentés par la (Fig. 5.23), où les vitesses longitudinale et de lacet sont considérées comme des mesures fournies, tandis que la mesure de la vitesse latérale du véhicule est seulement utilisée pour la comparaison avec les valeurs estimées. Ainsi, cette comparaison

montre que l'estimation de la vitesse latérale est bien établie. Les erreurs d'estimation sont représentées par la (Fig. 5.24). Les valeurs des erreurs sont notées dans le (Tab. 5.4).

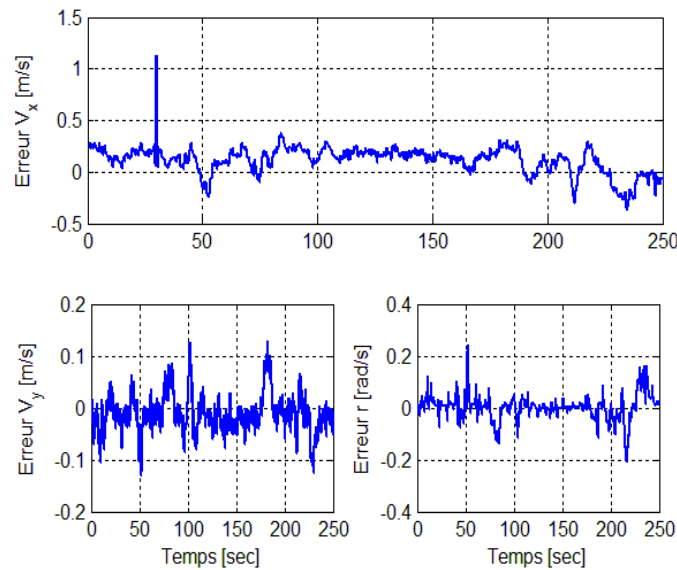


Fig. 5.24 : Erreur sur l'estimation de l'état dynamique

Caractéristique	Formule	Valeur		
		v_x	v_y	$\dot{\psi}$
Erreur (Err)	$x_m - \hat{x}$	[...]	[...]	[...]
Erreur Moyenne Relative	$\frac{\text{Moy}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	0.0063	0.0291	0.0062
Erreur Maximale Relative	$\frac{\text{Max}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	0.0246	0.3192	0.7123
Ecart Type	$\text{Moy}(Err^2) - (\text{Moy}(Err))^2$	0.0213	0.0014	0.0024
x_m : vecteur mesure				
$\hat{x}$: vecteur estimation				

Tab. 5.4 : Erreur de l'estimation de l'état dynamique

5.5. Estimation des forces de contact roue-sol

En se basant sur les résultats acceptables de l'estimation du vecteur d'état dynamique du véhicule, et particulièrement l'estimation de la vitesse latérale, on peut garantir une bonne estimation des forces longitudinales, latérales et normales en utilisant le modèle Dugoff. Les résultats d'estimation sont représentés par les figures (Fig. 5.25), (Fig. 5.26), et (Fig. 5.27) respectivement. Pour valider cette estimation, il est nécessaire d'avoir un capteur permettant de mesurer les forces d'interactions pneumatique/chaussée, qui n'est pas disponible au laboratoire. On se contente pour cela de la bonne estimation de l'état dynamique.

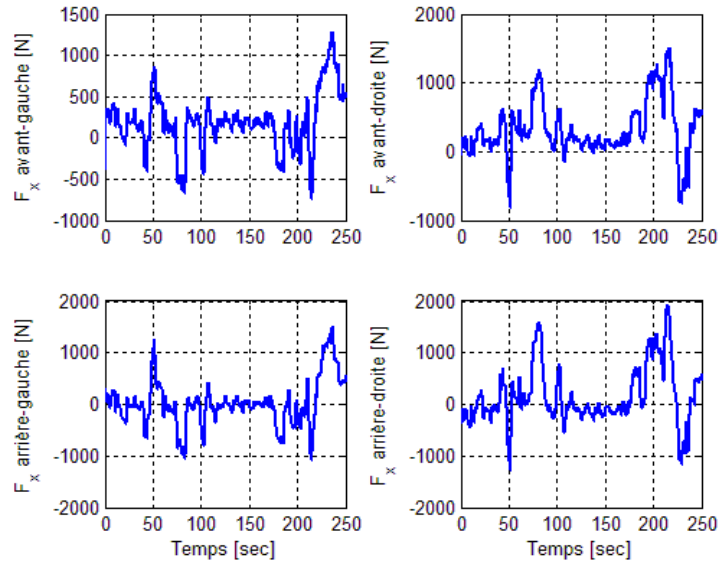


Fig. 5.25 : Estimation des forces longitudinales

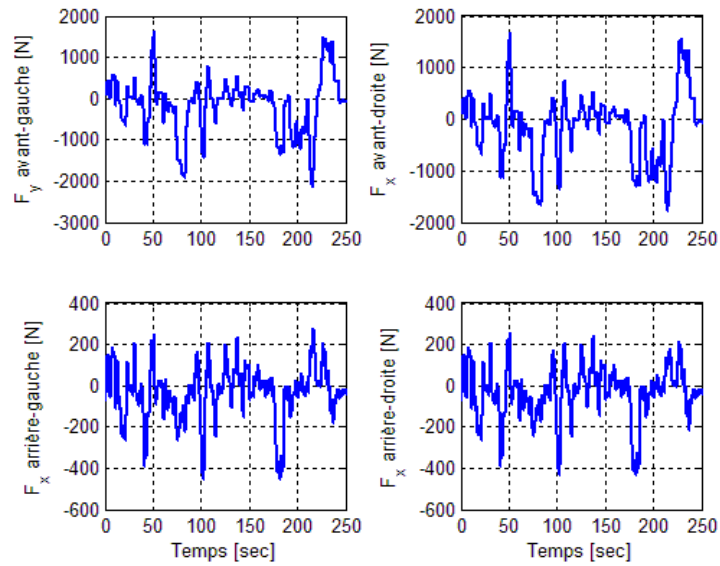


Fig. 5.26 : Estimation des forces latérales

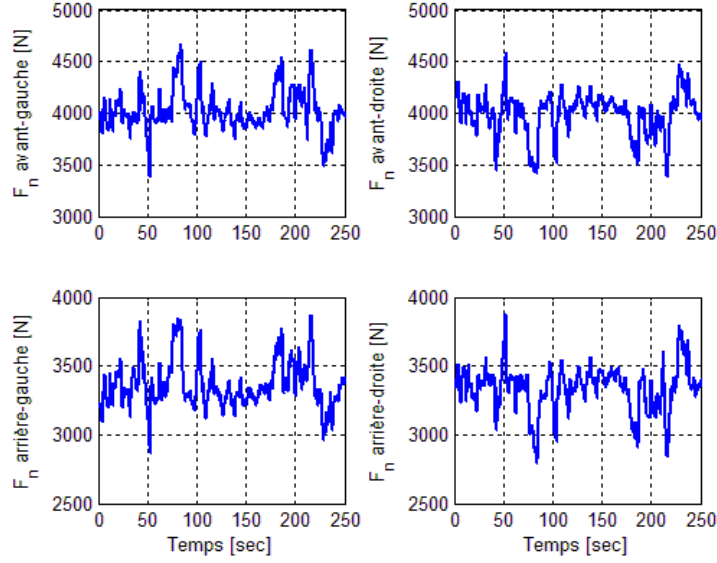


Fig. 5.27 : Estimation des forces normales

5.6. Estimation de l'angle de dérive

L'estimation de l'angle de dérive a été étudiée dans la littérature. Les premières recherches avaient comme objectif de définir des méthodes de mesure de l'angle de dérive. L'idée était donc d'installer des roulettes sur les essieux avant et arrière du véhicule [84] qui permettent d'estimer la valeur de l'angle de dérive en roulement. Cette méthode n'étant pas applicable en temps réel, les recherches se sont alors dirigées vers les capteurs fictifs de l'angle de dérive.

Une approche a été présentée par [85]. Cette approche consiste à estimer l'angle de dérive en utilisant deux GPS pour déterminer la vitesse du véhicule et son attitude. Cependant, le GPS présente un inconvénient qui est la mise à jour lente de la vitesse, ce qui le rend inutilisable par des systèmes de contrôle du véhicule. Une autre approche consiste à estimer l'angle de dérive en passant par l'estimation du lacet par des équations cinématique du véhicule [86]. Les approches présentées ont été basées sur l'utilisation d'un modèle de véhicule bicyclette à deux roues qui simplifie le comportement dynamique du véhicule. Une autre approche présentée par [87] est aussi basée sur le modèle bicyclette et sur la détermination des forces d'interactions roue/sol par un modèle de contact linéaire. L'estimation de l'angle de dérive est aussi faite par [57] en utilisant aussi un modèle bicyclette et un observateur à mode glissant.

Nous remarquons donc d'après les travaux ci-dessus qu'ils sont tous basés sur un modèle de véhicule bicyclette simplifié et un modèle de contact roue/sol linéaire. Dans notre étude nous nous sommes basés sur un modèle de véhicule à quatre roues plus complexe. La comparaison entre l'observateur à mode glissant et le filtre de Kalman étudiée par [57], nous permet de choisir ce dernier pour notre étude.

Sachant les vitesses longitudinale et latérale estimées du véhicule, v_x et v_y , au centre de gravité, nous pouvons déterminer l'estimation de l'angle de dérive par la formulation suivante :

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} \quad (\text{Eq. 5.38})$$

Cette équation permet d'obtenir les résultats présentés par la (Fig. 5.28) pour l'estimation de l'angle de dérive ainsi que l'erreur obtenue entre les valeurs estimés et ceux mesurés.

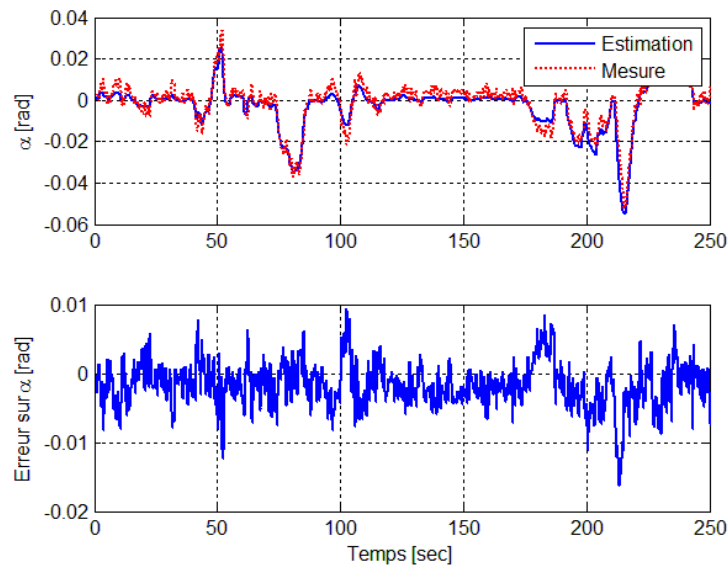


Fig. 5.28 : Estimation de l'angle de dérive

Caractéristique	Formule	Valeur
Erreur (Err)	$\alpha_m - \hat{\alpha}$	[...]
Erreur Moyenne Relative	$\frac{\text{Moy}(Err)}{\text{Max}(\alpha_m)}$	0.0268
Erreur Maximale Relative	$\frac{\text{Max}(Err)}{\text{Max}(\alpha_m)}$	0.8019
Ecart Type	$\text{Moy}(Err^2) - (\text{Moy}(Err))^2$	4.2×10^{-6}
α_m : vecteur mesure $\hat{\alpha}$: vecteur estimation		

Tab. 5.5 : Erreur de l'estimation de l'angle de dérive

Cette estimation dépend des mesures et de la trajectoire suivie. Pour évaluer la méthode d'estimation, il est nécessaire d'étudier différents cas limites tels que : le cas d'une trajectoire rectiligne droite (absence de braquage, de vitesse et d'accélération latérale), le cas d'une conduite à de faibles vitesses.

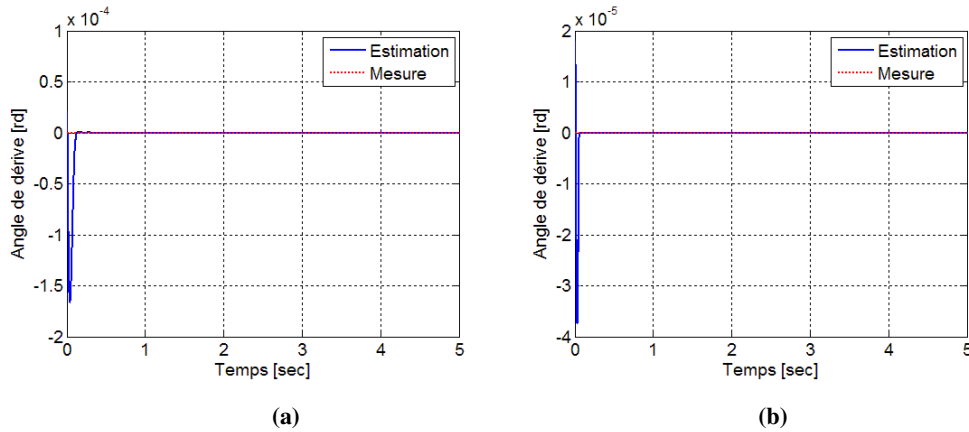


Fig. 5.29 : Estimation de l'angle de dérive : (a) pour une trajectoire rectiligne, (b) pour des faibles vitesses

Dans les figures (Fig. 5.29a) et (Fig. 5.29b), l'estimation de l'angle de dérive est représentée pour les deux cas cités précédemment : le cas d'une trajectoire rectiligne et celui pour de faible vitesse respectivement. Ces résultats d'estimation montrent que l'observateur converge au bout d'une vingtaine de secondes, ce qui est en fait considéré un peu long, mais les valeurs de l'estimation de l'angle de dérive sont réduites suffisamment (environ 10^{-5}) bien avant, ce qui permet d'assurer une bonne estimation durant le période de convergence.

5.7. Adaptation des raideurs pneumatiques

Le taux de glissement du véhicule dépend des valeurs des forces de contact roue/sol. Il a été déjà présenté dans le chapitre (4) que l'évolution des forces pneumatique-chaussée en fonction du comportement dynamique du véhicule sur la route, montre qu'il existe trois régimes principaux de contact roue-sol.

- Le régime de linéaire.
- Le régime de pseudo-glissement.
- Le régime de glissement.

Afin de pouvoir suivre l'évolution des efforts dans la zone de pseudo glissement en vue de la détection des situations critiques de perte de contrôle, il est nécessaire de considérer les caractéristiques non-linéaires et les paramètres du modèle, variant dans le temps (les raideurs des pneumatiques C_i et K_i). Pour cela, nous allons considérer un modèle non linéaire adaptatif où les raideurs pneumatiques sont adaptées aux caractéristiques non linéaires des forces appliquées sur les pneumatiques.

Dans cette partie, nous allons développer une méthode pour adapter les raideurs longitudinales et latérales des pneumatiques. Plusieurs méthodes existent dans la littérature, nous pouvons citer les travaux suivants : J. Ryu dans [88] adapte les raideurs latérales des pneumatiques, le moment d'inertie suivant l'axe $\vec{Z}$, ainsi que la distance entre le centre de gravité et l'essieu avant et arrière avec un algorithme récursif d'estimation des moindres carrés. Dans cette méthode, les états dynamiques sont estimés à partir d'un filtre de Kalman cinématique, qui n'est pas fondé sur les paramètres physiques du véhicule. La méthode décrite dans [89] estime les raideurs latérales courantes en utilisant des mesures de vitesses GPS. Cependant, Les forces latérales, appliquées aux roues sont déterminées à partir des accélérations latérales sans considérer explicitement le transfert de charges sur les roues.

L'approche utilisée dans [90], pour adapter les raideurs latérales des pneumatiques est basée sur une formule non linéaire d'approximation paramétrique. Cette méthode tient compte du transfert de charges des roues. Les paramètres peuvent être adaptés à un type spécifique de pneu en appliquant une méthode numérique d'optimisation, appelée « Levenberg-Marquardt-Optimization ».

Nous utiliserons dans notre approche, le modèle de Pacejka pour représenter les efforts exercés sur chaque pneumatique. Comme il a été mentionné dans la section (3.1), les forces normales appliquées sur les roues, varient en fonction des accélérations longitudinale $\vec{a}_x$ et latérale $\vec{a}_y$. Le transfert de charges sur les roues est alors calculé en utilisant les formules (Eq. 5.15).

Afin d'identifier les raideurs longitudinales et latérales des pneumatiques, nous proposons la méthode d'adaptation représentée sur la (Fig. 5.30).

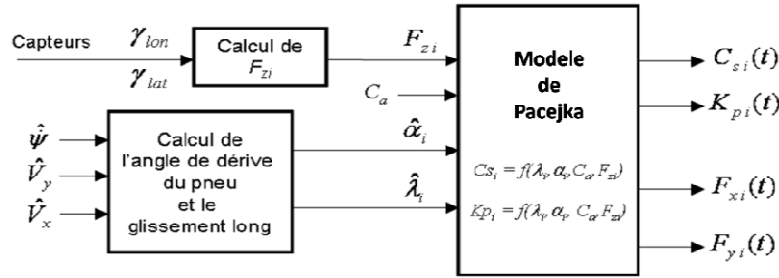


Fig. 5.30 : Bloc diagramme de l'estimation des raideurs pneumatiques

Les forces normales appliquées sur chaque pneumatique sont calculées à partir des mesures d'accélération (longitudinale et latérale). Le glissement longitudinal et l'angle de dérive latérale de chaque pneu sont calculés à partir de la dérive latérale du véhicule, la vitesse longitudinale et celle de lacet, estimées. Par la suite, les forces longitudinales et latérales appliquées sur chaque pneu sont calculées en utilisant la force normale, la dérive latérale du pneu, le glissement longitudinal et l'angle de carrossage C_a . A la fin, les coefficients des raideurs pneumatiques seront calculés comme suit :

$$\begin{cases} K_i = F_{xi}(t)/\lambda_i(t) \\ C_i = F_{yi}(t)/\alpha_i(t) \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.39})$$

Ainsi, l'estimation des raideurs pneumatiques longitudinale et latérale est présentée par les figures (Fig. 5.31) et (Fig. 5.32).

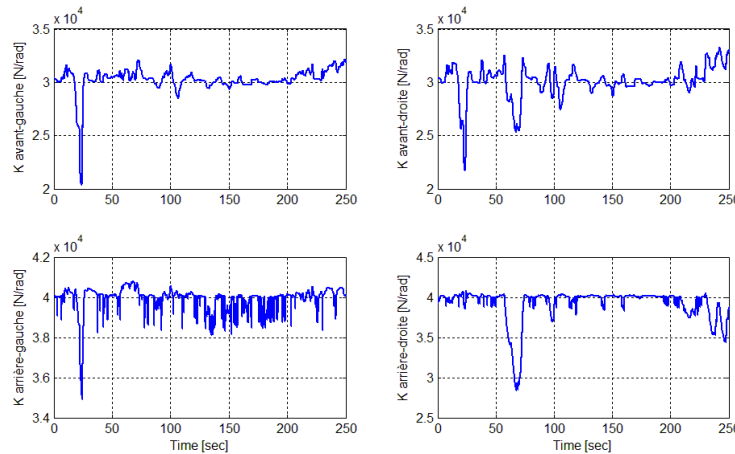


Fig. 5.31 : Raideurs pneumatiques longitudinales estimées

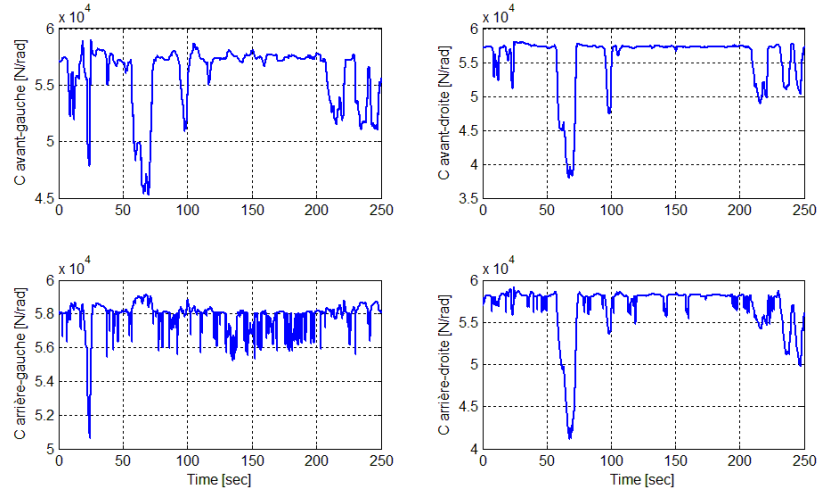


Fig. 5.32 : Raideurs pneumatiques latérales estimés

5.8. Ré-estimation de l'angle de dérive

L'estimation des raideurs longitudinale et latérale des pneus est faite pour adapter l'estimation de l'angle de dérive déjà faite, afin de suivre l'évolution des forces d'interaction pneumatique/chaussée. Pour cela, il est nécessaire d'estimer à nouveau l'angle de dérive à partir des raideurs des pneus estimées et puis comparer les résultats à ceux de l'estimation précédente.

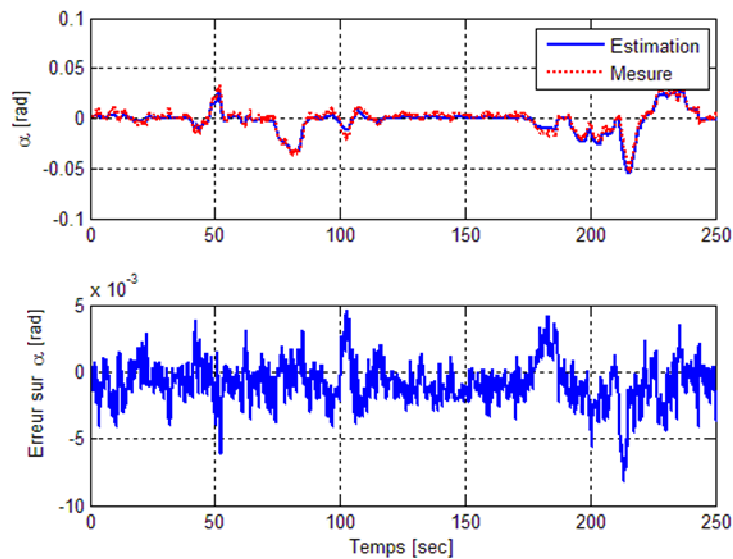


Fig. 5.33 : Estimation de l'angle de dérive en fonction de raideurs estimées

En considérant la même trajectoire que celle de la première estimation de l'angle de dérive, les nouveaux résultats d'estimation sont représentés par la (Fig. 5.33). En comparant les figures (Fig. 5.33) et (Fig. 5.28), nous trouvons que la nouvelle estimation de l'angle de dérive est plus précise que la première. La nouvelle erreur d'estimation est inférieure à la première d'un facteur 10. Nous pouvons alors remarquer l'influence de l'adaptation des raideurs des pneus sur l'estimation de l'angle de dérive.

Caractéristique	Formule	Valeur
Erreur (Err)	$\alpha_m - \hat{\alpha}$	[...]
Erreur Moyenne Relative	$\frac{\text{Moy}(Err)}{\text{Max}(\alpha_m)}$	0.0082
Erreur Maximale Relative	$\frac{\text{Max}(Err)}{\text{Max}(\alpha_m)}$	0.527
Ecart Type	$\text{Moy}(Err^2) - (\text{Moy}(Err))^2$	3.392×10^{-6}
α_m : vecteur mesure		
$\hat{\alpha}$: vecteur estimation		

Tab. 5.6 : Erreur de l'estimation de l'angle de dérive

5.9. Sensibilité de l'observateur vis-à-vis les paramètres du véhicule

L'estimation de l'angle de dérive en utilisant la méthode déjà décrite ci-dessus est basée sur la connaissance de diverses caractéristiques du véhicule. Cependant, ces caractéristiques sont propres à chaque véhicule et sont définies par les constructeurs d'automobiles. Certains paramètres changent en fonction du temps, telle que la masse et sa distribution, qui varient en fonction du nombre des passagers et de la charge du véhicule. D'autres paramètres sont constants et ne changent pas la dynamique du véhicule.

La masse du véhicule est un paramètre important qui influe sur la dynamique du véhicule en contribuant à la définition des forces normales au point de contact pneumatique/chaussée. La distribution de la masse dans le véhicule est aussi un paramètre important qui varie dans le véhicule et change son comportement dynamique. La distribution de la masse définit la position du centre de la masse sur l'axe longitudinal du véhicule. Ainsi, elle détermine les valeurs L_f et L_r correspondant à la distance du centre de gravité aux essieux avant et arrière.

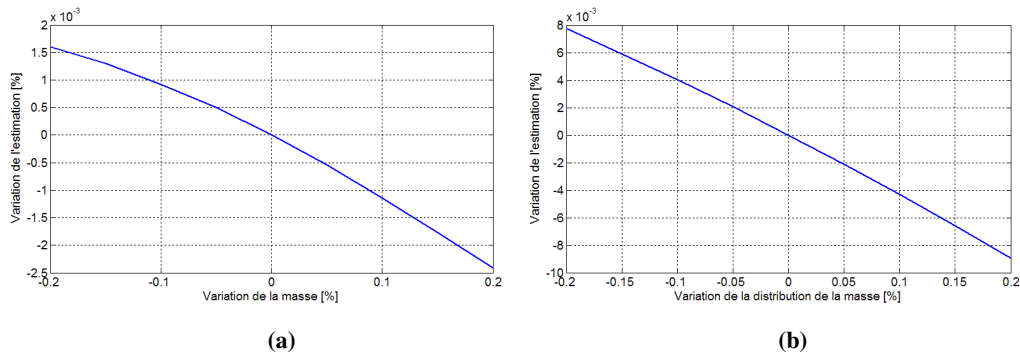


Fig. 5.34 : Sensibilité de l'estimation de l'angle de dérive en fonction de la variation de la masse (a) et la distribution de la masse (b)

Dans cette section, nous nous intéressons à l'étude de l'influence de la variation de ces deux paramètres sur l'estimation de l'angle de dérive, et par la suite à définir la sensibilité envers la variation de ces paramètres. Une variation entre -20% et 20 % est considérée pour chaque paramètre. La variation dans l'estimation de l'angle de dérive est représentée en fonction de la variation de chaque paramètre dans les figures (Fig. 5.34a) et (Fig. 5.34b).

Ces figures montrent que l'estimation de l'angle de dérive ne subit pas d'influence de par la variation de la masse ou sa distribution dans le véhicule. En fait, pour une variation entre -20% et 20% , la variation de l'estimation est environ de l'ordre de -2×10^{-6} et 1.5×10^{-6} respectivement, ce qui est considéré comme insignifiant. De même, la variation de la distribution de la masse n'influe pas sur l'estimation de l'angle de dérive. Une variation entre -20% et 20% implique une variation de l'estimation de l'ordre de -8×10^{-6} et 6×10^{-6} . Ces résultats garantissent que l'observateur de l'angle de dérive est robuste et convenable pour être utilisé dans le développement d'un système d'assistance au conducteur.

6. Validation expérimentale

Les simulations et les estimations ne sont pas suffisantes pour valider l'application de l'observateur développé qui détermine l'angle de dérive ainsi que d'autres caractéristiques et paramètres, malgré les bons résultats d'estimation qui ont été comparés aux mesures réelles. Cependant, l'implémentation de l'observateur dans le véhicule, et l'installation de tous les capteurs nécessaires peuvent être considérées comme un défi important afin d'aboutir aux résultats désirés de cette application et d'obtenir une bonne estimation et identification de tous les paramètres requis, en temps réel.

Pour cela, nous nous sommes intéressés à valider notre travail par implémentation en temps réel pour prouver que celui-ci est applicable sur les véhicules de série équipés par les capteurs nécessaires.

6.1. Zone d'expérimentation

Le LIVIC, Laboratoire sur les Interactions Véhicule-Infrastructure-Conducteur, est équipé de trois véhicules de test, qui sont munis de capteurs importants tel que le GPS, Correvit, Codeur optique, etc. Le laboratoire est localisé à Satory, où se trouve la piste des tests qui est utilisée pour faire les expérimentations avec le véhicule. Cette opportunité nous offre une zone d'expérimentation qui sera utilisée pour valider notre travail et comparer les résultats d'estimation aux résultats en temps réel. Le véhicule utilisé, les capteurs, ainsi que la piste de Satory sont représentés par la (Fig. 5.35).



Fig. 5.35 : Equipements et piste d'essai du LIVIC

6.2. Résultats

L'implémentation en temps réel de l'observateur nous mène aux résultats représentés par les figures (Fig. 5.36a) et (Fig. 5.36b) qui montrent l'estimation du vecteur d'état dynamique du véhicule et l'angle de dérive respectivement. Sur ces figures, nous remarquons une bonne estimation qui valide l'efficacité de notre observateur et sa robustesse : les estimations en temps réel de l'observateur et les mesures sont fortement similaires.

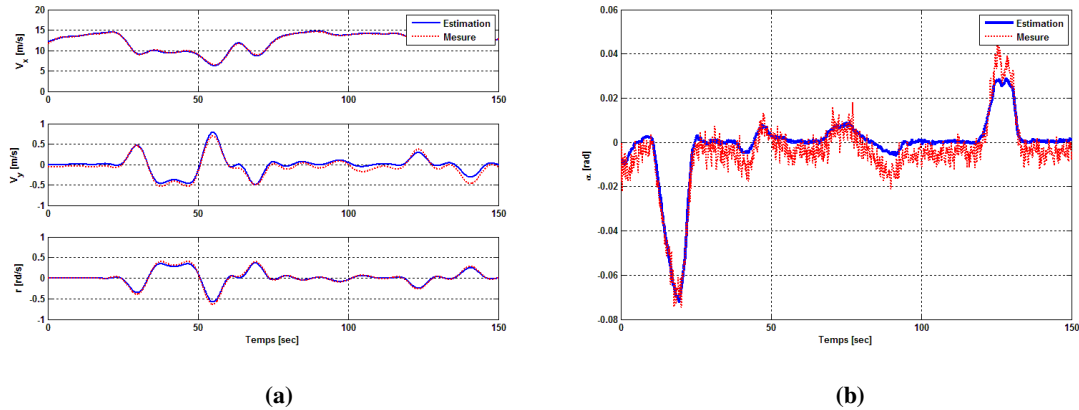


Fig. 5.36 : Estimation en temps réel de l'état dynamique (a) et l'angle de dérive (b)

Caractéristique	Formule	Valeur		
		v_x	v_y	$\dot{\psi}$
Erreur (Err)	$x_m - \hat{x}$	[...]	[...]	[...]
Erreur Moyenne Relative	$\frac{\text{Moy}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	0.0103	0.0311	0.0054
Erreur Maximale Relative	$\frac{\text{Max}(Err)}{\text{Max}(x_m)}$	0.021	0.4092	0.6601
Ecart Type	$\text{Moy}(Err^2) - (\text{Moy}(Err))^2$	0.018	0.002	0.0010
x_m : vecteur mesure $\hat{x}$: vecteur estimation				

Tab. 5.7 : Erreur de l'estimation de l'état dynamique

Caractéristique	Formule	Valeur
Erreur (Err)	$\alpha_m - \hat{\alpha}$	[...]
Erreur Moyenne Relative	$\frac{\text{Moy}(Err)}{\text{Max}(\alpha_m)}$	0.0325
Erreur Maximale Relative	$\frac{\text{Max}(Err)}{\text{Max}(\alpha_m)}$	0.9113
Ecart Type	$\text{Moy}(Err^2) - (\text{Moy}(Err))^2$	5.402×10^{-6}

α_m : vecteur mesure

$\hat{\alpha}$: vecteur estimation

Tab. 5.8 : Erreur de l'estimation de l'angle de dérive

7. Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthodologie qui a abouti à estimer l'un des paramètres les plus importants pour la détermination de l'état dynamique du véhicule. Ce paramètre, l'angle de dérive, est nécessaire pour déterminer la vitesse limite du véhicule. En fait, une valeur supérieure à un seuil de l'angle de dérive à une vitesse élevée peut entraîner une situation critique. Nous nous intéressons alors à diminuer la vitesse en fonction de cette valeur. La liaison entre l'angle de dérive et la vitesse sera traitée dans le chapitre suivant. Cependant, dans ce chapitre, nous avons présenté l'estimation de l'angle de dérive en utilisant le modèle de véhicule développé précédemment et le filtre de Kalman comme méthode d'estimation.

Les résultats de l'estimation ont été validés par des mesures sur les véhicules de test du LIVIC. Une implémentation de l'observateur et des expérimentations en temps réel ont été faites et nous avons eu une bonne estimation.

D'autres paramètres de la dynamique du véhicule ont été aussi estimés, telles que les forces de contact roue/sol, les efforts du vent, les raideurs des pneumatiques, l'état dynamique, etc. le travail suivant est donc de relier ces estimations au calcul de la vitesse limite via le calcul de la vitesse en fonction de l'angle de dérive. En effet, nous utiliserons l'estimation de l'angle de dérive comme une entrée du système d'alerte pour voir selon cette valeur estimée la nécessité de déclencher une alerte ou pas.

PARTIE III : DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME D'ALERTE À DES VITESSES EXCESSIVES

CHAPITRE 6 : DÉVELOPPEMENT THÉORIQUE DU SYSTÈME D'ALERTE

1. Introduction

La nouvelle approche proposée pour la détermination du profil de la vitesse maximale constitue un couplage entre les différentes caractéristiques influentes sur la conduite, telles que la dynamique du véhicule, le type du conducteur, les caractéristiques de l'infrastructure et les conditions de l'environnement. Cette approche est fondée sur l'étude de l'influence de chaque paramètre considéré sur la vitesse du véhicule. Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les différents paramètres pouvant être importants pour la détermination de la vitesse limite ainsi que le fonctionnement général du système d'alerte. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à étudier théoriquement ces paramètres, les qualifier en fonction du niveau d'importance pour le calcul de la vitesse, et ensuite de déterminer la valeur de la vitesse maximale.

La (Fig. 6.1) décrit en détail l'architecture du système d'alerte qui a été présenté dans le chapitre précédent. Cette architecture se divise en quatre blocs le processus permettant d'aboutir à une génération d'alerte dans le cas nécessaire.

- Bloc 1 : ce bloc consiste à définir les limitations de la vitesse en fonction des systèmes nationaux définis par l'état. Ces systèmes ont été présentés en détail dans le chapitre (2). Il suffit donc de les intégrer dans le système d'alerte pour calculer la vitesse maximale en fonction de ces limitations. Elles peuvent être déterminées par une carte digitale comprenant les caractéristiques des routes, par un GPS ou même par une base de données spécifique.
- Bloc 2 : cette partie permet de définir une méthode de calcul d'une vitesse de référence parmi les différentes méthodes existantes dans la littérature. En se basant sur l'étude comparative présentée dans le chapitre (2) nous choisissons d'utiliser la méthode SAVV. Nous introduisons par la suite dans ce chapitre les améliorations ajoutées à la SAVV pour pouvoir prendre en considération les efforts du vent et leur influence sur la vitesse du véhicule.
- Bloc 3 : ce bloc est nécessaire pour développer une méthode permettant de prendre en considération le reste des paramètres influents sur la vitesse. En effet, des capteurs seront utilisés pour mesurer les paramètres mesurables (caractéristiques de la route), des méthodes d'estimation seront utilisées pour estimer les paramètres non mesurables ou mesurés par des capteurs onéreux (dynamique du véhicule) et

d'autres paramètres seront déterminés par des méthodes de calcul spécifique (caractéristiques de l'environnement).

- Après la détermination de ces paramètres, une méthode de traitement des données sera mise en œuvre pour déterminer une fonction d'ajustement pour chaque paramètre en le liant à la vitesse. Cette fonction servira ensuite à créer LUT qui permettra de définir un facteur d'ajustement de la vitesse en fonction de chaque paramètre.
- Bloc 4 : après avoir défini les limitations nationales, la vitesse de référence, et la vitesse ajustée par les paramètres, nous pouvons donc établir une procédure pour définir la vitesse limite. Cette vitesse sera ensuite comparée à la vitesse actuelle du véhicule et dans le cas d'une vitesse supérieure au profil maximal, une alerte est générée au conducteur.

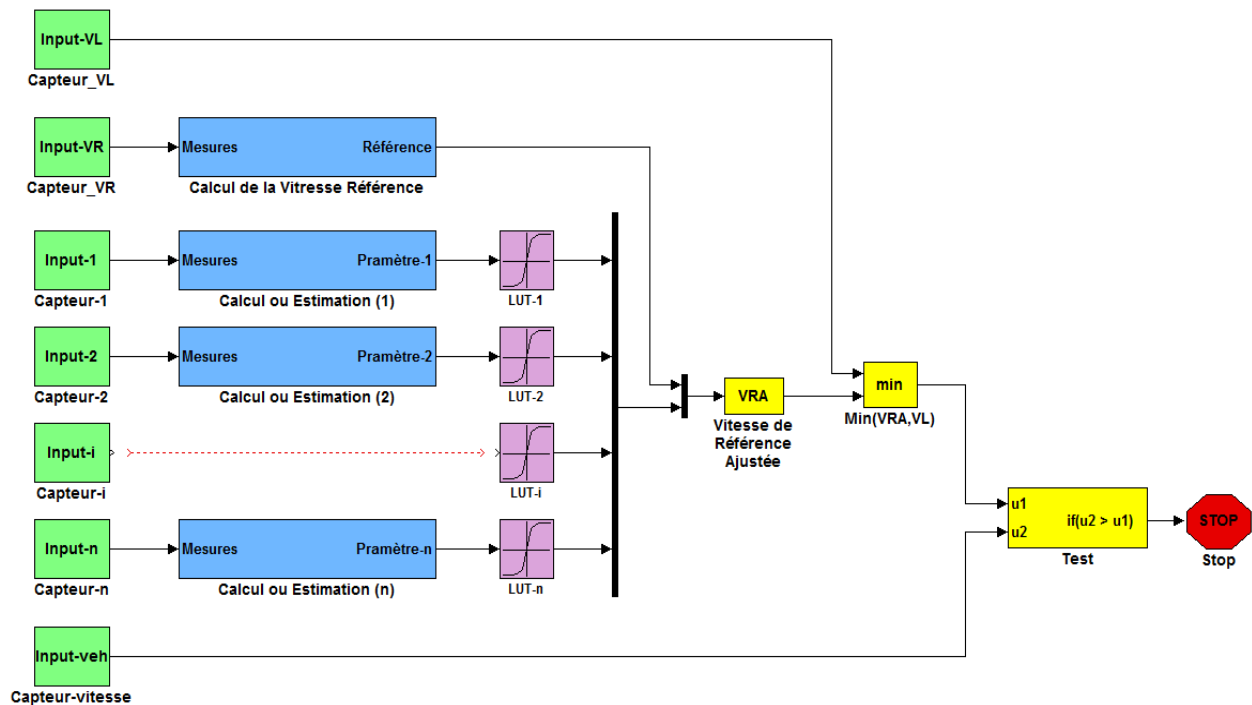


Fig. 6.1 : Architecture du système d'alerte

Ce principe de fonctionnement est modulaire. Il permet d'ajouter ou de supprimer certains paramètres et même modifier un paramètre déjà existant sans aucun changement dans le fonctionnement global du système. Le but de ce chapitre est donc de présenter en détail le choix des différents paramètres étudiés, les fonctions associées ainsi que le développement des LUT nécessaires pour le fonctionnement du système d'alerte.

2. Conditions assurant une conduite sécurisée

L'un des objectifs de la recherche dans le domaine de la sécurité routière est d'identifier les dangers potentiels, d'assurer la conduite sécurisée. Ce type de conduite consiste à éviter les situations critiques pouvant entraîner des accidents qui sont parfois très graves et mortels tout en assurant le déplacement du conducteur et des passagers vers l'endroit désiré avec un risque minimum. La conduite sécurisée peut être assurée au travers de différentes fonctionnalités : l'évitement des sorties de la voie, la conservation de la distance de sécurité intervéhiculaire, la contrôlabilité du véhicule, l'aide au freinage, l'assurance de la stabilité du véhicule, etc.

La conduite sécurisée est aussi assurée par la limitation de la vitesse du véhicule au-dessous d'une valeur maximale déterminée en fonction des différentes conditions de la conduite. Nous pouvons considérer deux scénarios principaux : le passage sur un virage et la descente d'une pente. Dans ces deux cas, nous remarquons que la vitesse est essentielle pour passer les situations critiques. En effet, si nous pratiquons une vitesse élevée sur un virage ou sur une descente, nous risquons d'avoir une sortie de route ou une perte de contrôle du véhicule respectivement.

Le conducteur représente un facteur important pour cette étude. En fait, il existe deux hypothèses à considérer : le conducteur est considéré à l'intérieur de la boucle de la conduite ou à l'extérieur de cette boucle. Dans le premier cas, il sera nécessaire de lui offrir un maximum de contrôlabilité. Il aura donc besoin des renseignements sur l'état de son véhicule et les meilleures configurations en fonction des conditions extérieures pour assurer une bonne conduite. Il faut donc l'avertir suffisamment à l'avance d'une situation critique possible. Dans le deuxième cas, les systèmes d'aide à la conduite remplaceront le conducteur. L'utilité sera donc de fournir les données nécessaires sous forme de vitesse aux différents systèmes.

Cette approche nécessite alors de définir certaines conditions assurant la conduite sécurisée et pouvant être traduites en terme de vitesse limite tout en considérant les différents paramètres influents. Ces conditions peuvent être classées selon la source du risque agissant sur la conduite du véhicule : les conditions liées à l'environnement, à l'infrastructure et au véhicule. Ces conditions sont dédiées à la dynamique longitudinale du véhicule. Cependant, afin de considérer la dynamique latérale du véhicule, nous pouvons aussi définir une autre condition sur la dérive du véhicule ainsi que sur les caractéristiques géométriques de l'infrastructure.

2.1. Conditions liées à l'environnement

Les conditions de l'environnement ont une influence importante sur la sécurité routière et plus précisément sur la vitesse du véhicule. Sur la (Fig. 6.2) nous remarquons un état de conduite dangereux avec de la pluie et du brouillard, c'est une mauvaise visibilité. De telles conditions nécessitent de prendre davantage de précautions pour éviter les accidents. Diminuer la vitesse du véhicule est la meilleure solution dans ces conditions. Afin de déterminer le taux de diminution de la vitesse en fonction de la visibilité sur la route, il est recommandé de définir une condition assurant la sécurité routière. Cette condition peut être simplifiée par l'énoncé suivant :

Distance d'arrêt du véhicule doit être inférieure ou égale (en cas limite) à la distance de visibilité



Fig. 6.2 : Visibilité atmosphérique

Cette condition permet de déterminer la vitesse limite en fonction de la distance de visibilité atmosphérique. Le calcul de la vitesse en fonction de la distance de visibilité, ainsi que le calcul de cette distance seront développés par la suite.

2.2. Conditions liées à l'infrastructure

Le profil de la route dépend de l'infrastructure qui présente plusieurs caractéristiques telles que la pente, le dévers, la courbure, etc. Ces caractéristiques entraînent des contraintes sur la conduite pour s'y adapter et assurer la bonne conduite. Il est donc nécessaire de définir la vitesse limite du véhicule en fonction de ces caractéristiques. Pour y aboutir, nous présentons une condition pouvant être importante pour limiter la vitesse. Cette condition est la suivante :

Distance d'arrêt du véhicule doit être inférieure ou égale (en cas limite) à la distance de visibilité

Elle permet de déterminer la vitesse limite en fonction de la distance de visibilité géométrique en considérant les caractéristiques géométriques de l'infrastructure telles que : l'accotement de la route, la pente, le dévers, l'angle saillant, ainsi que d'autres caractéristiques géométriques.

2.3. Conditions liées au trafic

Pour considérer le trafic routier, nous pouvons définir différentes conditions de sécurité en ce qui concerne l'emplacement du véhicule l'ensemble du trafic, cette condition peut être sous la forme suivante :

Distance d'arrêt du véhicule doit être inférieure ou égale (en cas limite) à la distance intervéhiculaire

Cette condition permet d'étudier l'influence du comportement du conducteur (temps de réponse) sur la vitesse. Une fois la distance intervéhiculaire est limitée à la distance de freinage, cela nous garantit, dans le cas d'arrêt brusque, un freinage sans collision.

2.4. Conditions liées au véhicule

Pour considérer la dynamique du véhicule et étudier son influence sur la vitesse limite, nous devons définir une condition de sécurité. En étudiant l'état dynamique du véhicule, nous pouvons définir différentes conditions de sécurité en fonction des paramètres dynamique étudiés (par exemple : l'angle de dérive). Nous allons donc définir la condition de sécurité suivante :

Angle de dérive du véhicule doit être inférieur ou égale (en cas limite) à l'angle de dérive nécessaire pour négocier le profil de la route

3. Détermination de la distance d'arrêt, de visibilité et intervéhiculaire

Dans le paragraphe précédent, nous avons cité plusieurs grandeurs importantes telles que la distance d'arrêt du véhicule, la distance de visibilité atmosphérique, la distance de visibilité géométrique et la distance intervéhiculaire. Cependant, l'utilisation de ces distances exige de les définir pour savoir les adapter aux conditions de conduite sécurisée. Nous présenterons dans ce paragraphe ces distances en détail.

3.1. Distance d'arrêt du véhicule

La distance d'arrêt du véhicule est la distance théorique nécessaire à un véhicule pour s'arrêter compte tenu de sa vitesse [111]. Elle est calculée comme la somme de la distance de freinage et de la distance parcourue pendant le temps de perception réaction ou dans un autre sens le temps de réaction du conducteur (Fig. 6.3).

$$d_a = d_f + d_{react} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

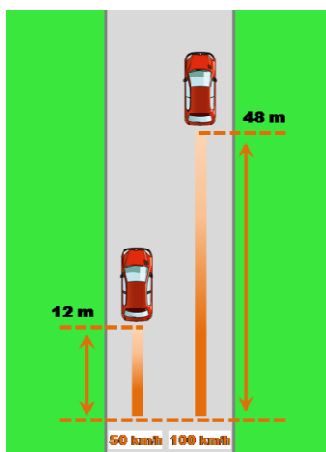


Fig. 6.3 : Distance de freinage

En courbe, il convient de prendre en compte l'accroissement de la distance d'arrêt. En effet, le freinage doit être moins énergique en courbe et il est donc admis de majorer de 25% la distance de freinage pour les virages de rayon inférieur à $5V$ (la vitesse V est exprimée en km/h).

3.1.1. Distance de freinage

C'est la distance nécessaire à un véhicule pour passer de sa vitesse initiale à 0 km/h (Fig. 6.3) [111]. Elle ne correspond pas aux données des constructeurs automobiles et est fonction de la vitesse initiale, de la pente et du coefficient de frottement longitudinal (valeur comprise entre 0 et 1).

$$d_f = \frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Où,

- v : la vitesse d'avancement du véhicule.
- g : la gravité de la terre.
- μ : l'adhérence disponible sur la route.
- p : la déclivité de la route.

3.1.2. Distance de perception réaction

C'est la distance parcourue à vitesse constante v pendant le temps de perception réaction. Ce temps est constituée du temps physiologique de perception-réaction (1.3 à 1.5 secondes) et le temps mort mécanique d'entrée en action des freins (~ 0.5 secondes). Pour le calcul, on adopte généralement la valeur de 2 secondes pour ce temps de perception réaction quelle que soit la vitesse même s'il est admis qu'en situation d'attention soutenue (vitesse supérieure à 100 km/h ou trafic soutenu à vitesse

importante) ce temps peut être réduit à 1.8 secondes. Toutefois, une modification de 0.2 secondes joue peu sur la distance d'arrêt (par exemple : 5m à 90 km/h). Les recherches montrent aussi que le temps physiologique de perception-réaction change d'un conducteur à l'autre, il peut être donc utile d'étudier l'influence de ce paramètre sur la détermination de la vitesse limite.

$$d_{react} = t_{rep} \cdot v \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Avec,

- t_{rep} : le temps de perception-réaction du conducteur.
- v : la vitesse d'avancement du véhicule.

La distance d'arrêt du véhicule prend alors la forme :

$$d_a = \frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \quad (\text{Eq. 6.4})$$

3.2. Distance de visibilité

Pour conduire en toute sécurité, il est important d'avoir un champ visuel continu adéquat. Toute restriction du champ visuel peut rendre la conduite dangereuse. L'œil du conducteur est réputé situé à 1 m de haut, à 2 m du bord droit de la chaussée, à 4 m en retrait du bord de la chaussée de la voie principale pour les carrefours équipés de STOP (Fig. 6.4). Ces caractéristiques entraînent des contraintes sur la visibilité de la route par le conducteur. Cela pourrait être dangereux et créer des conditions critiques de conduite, surtout sur les carrefours.

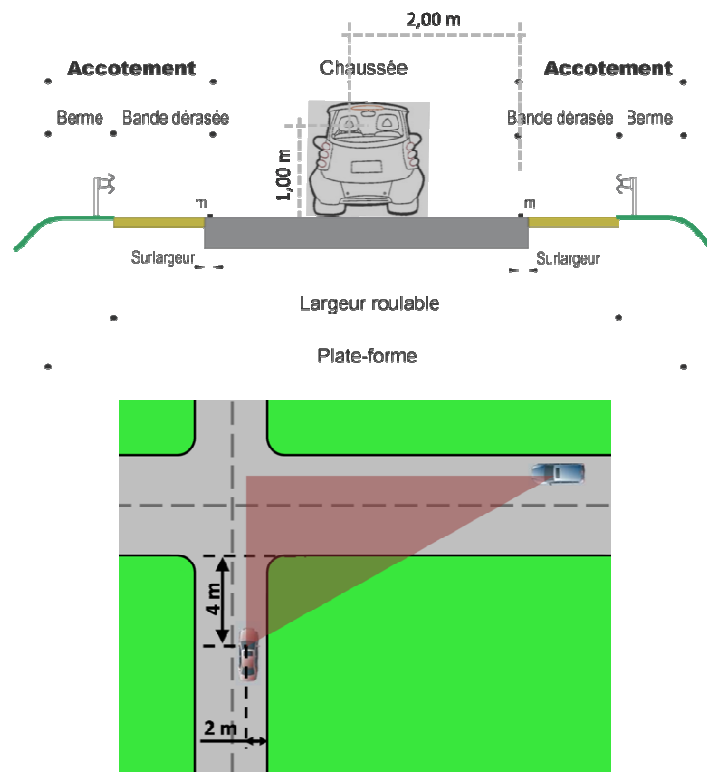


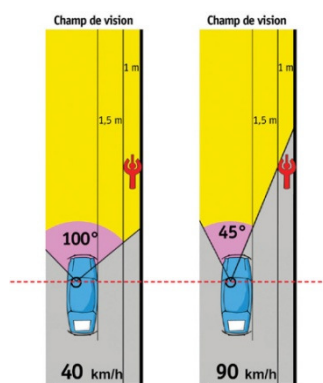
Fig. 6.4 : Position de l'œil du conducteur par rapport à la route

Le champ de vision recommandé pour assurer la conduite en sécurité est donc défini par le (Tab. 6.1) selon le type du véhicule.

Type du véhicule	Champ de vision recommandé
Véhicules de tourisme	120° continus le long du méridien horizontal et 15° continus au-dessus et su-dessous du point de fixation, les deux yeux ouverts et examinés ensemble
Véhicules commerciaux	150° continus le long du méridien horizontal et 20° continus au-dessus et su-dessous du point de fixation, les deux yeux ouverts et examinés ensemble

Tab. 6.1 : Champ de vision recommandé

Le champ de vision dépend aussi de la vitesse pratiquée. Pour une vitesse faible, le champ de vision est plus large que celui pour une vitesse élevée. La (Fig. 6.5) montre qu'un conducteur roulant à une vitesse de 40 km/h, a un champ de vision de 100° il est donc capable de détecter un cycliste situé devant lui à 1.5 m à droit. Par contre, le conducteur roulant à la vitesse de 90 km/h, a un champ de vision de 45° et donc il ne peut pas voir ce même cycliste.



Source : La gestion de la vitesse [11]

Fig. 6.5 : Champ de vision en fonction de la vitesse

La distance de visibilité est donc la profondeur du champ de vision du conducteur. Cette distance peut varier dans certaines conditions atmosphériques et géométriques. De fait, nous distinguons la distance de visibilité atmosphérique et la distance de visibilité géométrique.

3.2.1. Distance de visibilité atmosphérique

La visibilité atmosphérique ou météorologique est fonction des conditions atmosphérique et météorologique. Elle est alors différente entre le jour et la nuit, entre un temps sans pluie et un temps pluvieux, entre un temps clair et un autre couvert de brouillard, etc. La détection de la visibilité atmosphérique a été un sujet de recherche principale pour la sécurité routière. Des expériences ont été établies par [91] en utilisant des instruments de mesures tels que les transmissomètre et les diffusomètre. Ces instruments permettent de détecter le brouillard en mesurant le coefficient d'extinction. Une autre approche a été présentée par [92]. Cette approche consiste à remplacer les instruments utilisés ci-dessus par des caméras qui permettent de détecter aussi le brouillard. Cependant, ces approches présentées consistent à fixer les caméras sur l'infrastructure, ce qui n'est pas disponible sur tout le réseau routier. Pour palier cet inconvénient, les recherches suivies par [93] présentent une autre approche plus pratique qui consiste à utiliser la stéréovision embarquée (des caméras embarqués sur le véhicule). La distance de visibilité est donc mesurée par des méthodes de

stéréovision qui permettent de la déterminer en fonction des différentes conditions. Certaines de ces méthodes ont été développées au LIVIC [93] et ont été validées par des expérimentations en temps réel.

Les recherches poursuivies par la Commission Internationale de l'Eclairage [94] en 1987 ont permis de définir une distance conventionnelle, appelée « distance de visibilité météorologique » d_{met} qui est la plus grande distance à laquelle un objet noir de dimension convenable peut être vu sur le ciel à l'horizon. Cette distance peut être représentée sous la forme suivante :

$$d_{met} = -\frac{1}{k} \ln(0.05) \approx \frac{3}{k} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Avec,

- k : le coefficient d'extinction de l'atmosphère.
- 0.05 : le seuil de contraste adopté par la Commission Internationale de l'Eclairage.

Ces recherches ont été améliorées par [93] au LIVIC pour déterminer la distance de visibilité mobilisée sous la forme :

$$d_{mob} = -\frac{d_{met}}{3} \ln\left(\frac{\tilde{c}_{BN}}{1+\tilde{c}_{BN}}\right) \quad (\text{Eq. 6.6})$$

Où,

- d_{met} : la vitesse de visibilité météorologique.
- $\tilde{c}_{BN}$: le nouveau facteur de contraste déterminé par [95].

On remarque d'après les équations (Eq. 6.5) et (Eq. 6.6) que la distance de visibilité atmosphérique est fonction du coefficient d'extinction de l'atmosphère et du coefficient de contraste. Ces deux coefficients sont alors à mesurer (chapitre 3).

3.2.2. Distance de visibilité géométrique

La visibilité géométrique est fonction de la géométrie de l'infrastructure qui peut influencer sur la largeur et la profondeur du champ de vision. La visibilité géométrique se décline selon les enjeux. On peut considérer deux situations principales dont dépend la distance de visibilité géométrique : le profil en latéral de la route et le profil en longitudinal de la route. Pour le profil en latéral on parle de la distance de visibilité en virage, tandis que pour le profil en longitudinal on parle de la distance de visibilité en angle saillant [111].

En virage

La (Fig. 6.6) représente le profil d'un virage de rayon de courbure R . Cette figure permet de déterminer la distance de visibilité géométrique en virage :

$$d_{vis} = d_1 + d_2 \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Sachant que :

$$(R + e_1)^2 = d_1^2 + R^2 \quad (\text{Eq. 6.8})$$

$$(R + e_2)^2 = d_2^2 + R^2 \quad (\text{Eq. 6.9})$$

Supposant que : $d_1 = d_2 = \frac{d_{vis}}{2}$ et $e_1 = e_2 = e$, on aura donc :

$$d_{vis} = \sqrt{8Re} \quad (\text{Eq. 6.10})$$

Avec,

- R : le rayon de courbure du virage.
- e : la distance entre l'œil du conducteur et le masque latéral de la route.

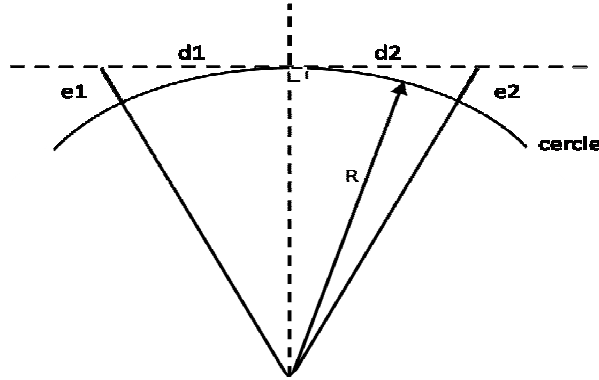


Fig. 6.6 : Trajectoire en virage

Pour appliquer la formule au conducteur, il faut considérer la position de son œil par rapport à la route (Fig. 6.7) :

$$e = 2m + la \quad (\text{Eq. 6.11})$$

Avec la est l'accotement, c'est la largeur libre entre le bord de chaussée et le masque latéral.

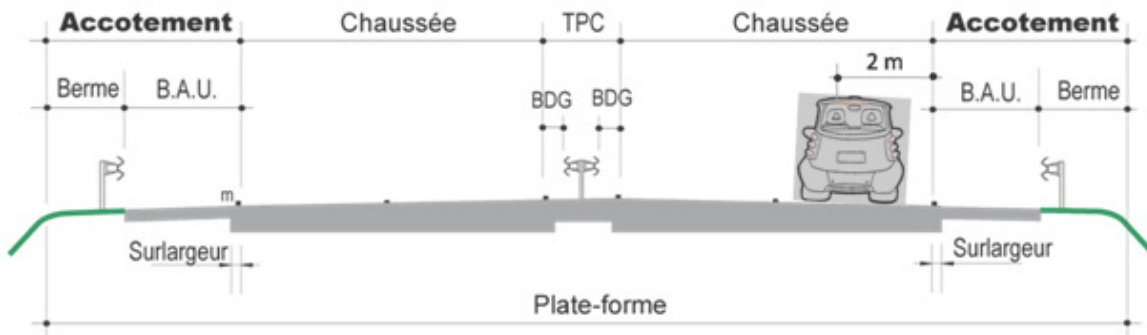


Fig. 6.7 : Position de l'œil du conducteur et calcul théorique du dégagement latéral

En angle saillant

la distance de visibilité dépend de la hauteur de l'œil du conducteur h_0 et de la hauteur visée h_v .

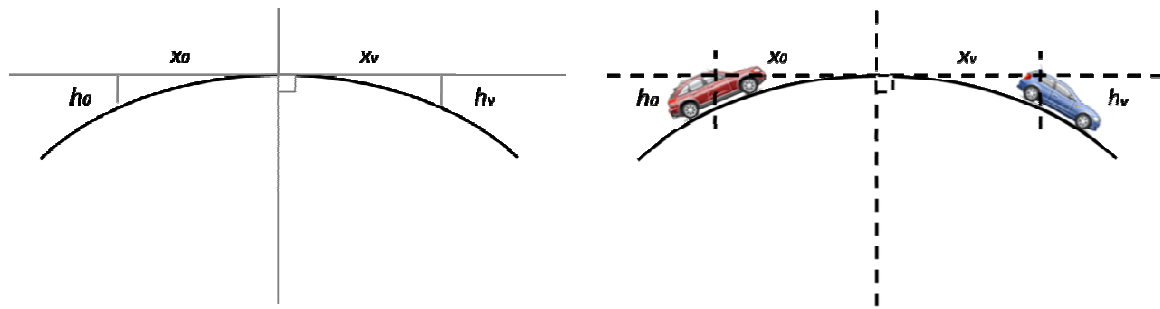


Fig. 6.8 : Profil en longitudinal en angle saillant

La formule utilisée ici peut être la dérivée de celle de la parabole (Fig. 6.8) :

$$h_0 = \frac{x_0^2}{2R_m} \text{ et } h_v = \frac{x_v^2}{2R_m} \quad (\text{Eq. 6.12})$$

Or,

$$d_{vis} = x_0 + x_v \quad (\text{Eq. 6.13})$$

La distance de visibilité devient donc sous la forme :

$$d_{vis} = \sqrt{2R_m}(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_v}) \quad (\text{Eq. 6.14})$$

3.3. Distance intervéhiculaire

La distance intervéhiculaire est la distance entre deux véhicules qui se suivent sur la même voie. Pour assurer une conduite en sécurité, il faut que le conducteur du second véhicule maintienne une distance de sécurité suffisante pour pouvoir éviter une collision en cas de ralentissement brusque ou d'arrêt subit du véhicule qui le précède. Cette distance est d'autant plus grande que la vitesse est élevée. Elle correspond à la distance parcourue par le véhicule pendant un délai d'au moins 2 secondes.

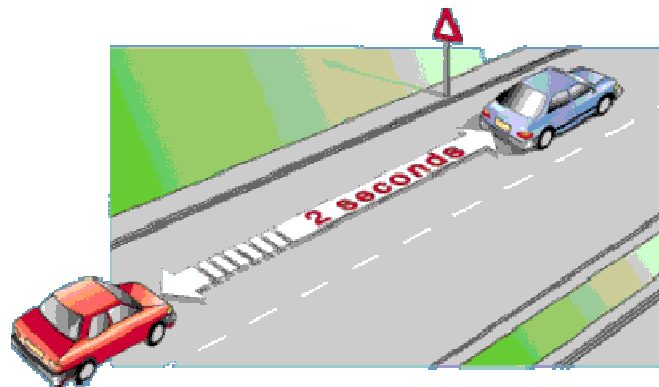


Fig. 6.9 : Distance intervéhiculaire

Hors agglomération, lorsque des véhicules ou des ensembles de véhicules, dont le poids total en charge ne dépasse pas les 3,5 tonnes, se suivent à la même vitesse, la distance de sécurité est d'au moins 50 mètres (Fig. 6.9). La valeur de la distance de sécurité, sur la base d'un temps de réaction réglementaire de 2 secondes, est en fonction de la vitesse v (exprimée en km/h) sous la forme suivante :

$$d_{intveh} = 0.56v \quad (\text{Eq. 6.15})$$

3.4. Conditions limites de conduite

En se basant sur le calcul des différentes distances nécessaires dans les paragraphes précédents, nous pouvons écrire les conditions sur la vitesse maximale :

Condition 1 : distance de freinage inférieure à la distance de visibilité.

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \leq d_{vis} \quad (\text{Eq. 6.16})$$

Pour une visibilité atmosphérique, l'équation devient :

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \leq -\frac{d_{met}}{3} \ln \left(\frac{\tilde{C}_{BN}}{1 + \tilde{C}_{BN}} \right) \quad (\text{Eq. 6.17})$$

Dans le cas d'une visibilité géométrique, l'équation sera :

En virage :

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \leq \sqrt{8Re} \quad (\text{Eq. 6.18})$$

En angle saillant :

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \leq \sqrt{2R}(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_v}) \quad (\text{Eq. 6.19})$$

Condition 2 : distance de freinage inférieure à la distance intervéhiculaire

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \leq d_{intveh} \quad (\text{Eq. 6.20})$$

Et donc,

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \leq 0.56v \quad (\text{Eq. 6.21})$$

4. Développement théorique des conditions limites

L'objectif de notre étude est de développer un système permettant de définir le profil de la vitesse maximale du véhicule selon les conditions atmosphériques, géométriques et dynamiques entourant le véhicule en temps réel. Il est donc impératif de lier la vitesse du véhicule aux différents paramètres influents par des relations permettant de définir la vitesse maximale pour une situation donnée.

Dans notre étude, nous considérons les facteurs principaux de la conduite : l'infrastructure, le véhicule, le conducteur et l'environnement. Nous allons donc représenter les modèles mathématiques liant les paramètres de ces trois facteurs à la vitesse du véhicule.

4.1. Condition sur l'environnement

Les caractéristiques principales de l'environnement présentant un impact sur la conduite se résument par le vent et la visibilité atmosphérique. Pour les prendre en considération, nous allons développer les différents modèles mathématiques liant la vitesse à ces paramètres.

4.1.1. Le vent

Le vent peut être considéré comme un perturbateur de la conduite du véhicule et de sa vitesse. Ainsi, la considération de l'impact des efforts du vent, et surtout les vents latéraux, sur la conduite peut être introduite selon deux approches. La première nécessite à ajouter les efforts aux équations de la modélisation du véhicule (chapitre 5). Cette approche peut être utile pour identifier l'influence du vent sur la dynamique globale du véhicule. Cependant, pour étudier l'impact du vent sur la vitesse nous nous intéressons à lier ces efforts directement à la vitesse. D'où la deuxième approche qui consiste à diminuer l'adhérence disponible sur la route en fonction des efforts du vent.

En effet, nous pouvons déterminer l'adhérence mobilisée par les efforts du vent. Ensuite, l'adhérence disponible sur la route sera minimisée pour récompenser les efforts du vent. Cette approche servira pour déterminer la vitesse en fonction de la nouvelle valeur de l'adhérence. Il faut alors itérer ce processus de manière à converger vers un profil de vitesse constant : dans une première étape le profil de vitesse est calculé sans les vents latéraux. Le profil de vitesse ainsi généré permet d'évaluer les forces et moments induits par le vent, et de fait, l'adhérence que le conducteur doit mobiliser pour maintenir son véhicule sur la voie. Cette adhérence mobilisée décrémente l'adhérence disponible. Sur cette base, un nouveau profil de vitesse est généré. Le processus est résumé dans le schéma suivant.

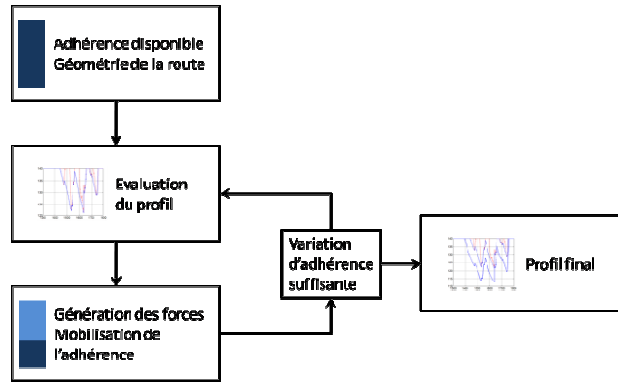


Fig. 6.10 : Méthode de calcul de la vitesse limite en considérant les efforts du vent

Les équations utilisées pour déterminer le profil de la vitesse en fonction de l'adhérence à chaque itération, sont les équations de la vitesse de référence SAVV. Les équations de la SAVV sont basées sur le principe de couplage des efforts en utilisant un modèle de Coulomb pour obtenir la portion d'adhérence mobilisée μ_{mob} par les forces transverses F_t et normales F_n .

$$\mu_{mob} = \frac{F_t}{F_n} \leq \mu_{max} \quad (\text{Eq. 6.22})$$

Où μ_{max} est l'adhérence maximale disponible. Comme $F_t^2 = F_{lat}^2 + F_{lon}^2$, nous obtenons :

$$\mu_{mob}^2 = \frac{F_{lat}^2 + F_{lon}^2}{F_n^2} = \mu_{lat}^2 + \mu_{lon}^2 \quad (\text{Eq. 6.23})$$

Ainsi, la plus haute vitesse sûre peut être définie comme étant celle qui mobilise le maximum d'adhérence disponible pour la décélération et l'accélération longitudinales et l'accélération latérale. Ainsi nous obtenons en exprimant les équations précédentes sur les deux essieux du véhicule :

$$\mu_{max} = \max \left(\sqrt{\mu_{lat,av}^2 + \mu_{lon,v}^2}, \sqrt{\mu_{lat,ar}^2 + \mu_{lon}^2} \right) \quad (\text{Eq. 6.24})$$

Or les conducteurs, dans leurs accélérations et décélérations, ne mobilisent qu'une portion de cette adhérence : ils préfèrent rester dans un domaine de friction plus restreint qui est inclus dans celui disponible (chapitre 4).

Nous obtenons donc deux expressions de la vitesse maximale admissible :

$$\begin{cases} \theta_{route} > 0 : V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 - \frac{H}{L_{av}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon} \mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat} \mu_{max} - \phi_{route} \right) \\ \theta_{route} < 0 : V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 + \frac{H}{L_{ar}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon} \mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat} \mu_{max} - \phi_{route} \right) \end{cases} \quad (\text{Eq. 6.25})$$

Ces équations nous permettent donc de prendre en considération les efforts du vent en mobilisant l'adhérence disponible. La (Fig. 6.11) montre les résultats obtenus par cette approche. Nous remarquons bien que pour un vent frappant le véhicule à une vitesse de 10 m/s, l'adhérence passe de 0.8 à 0.71. Ainsi, la vitesse limite passe aussi de 96 km/h à 91 km/h. Nous présenterons dans le paragraphe (4.5) une étude de sensibilité de la vitesse en fonction des paramètres du vent (vitesse et angle d'incidence), et cela pour bien comprendre l'influence du vent sur la vitesse limite.

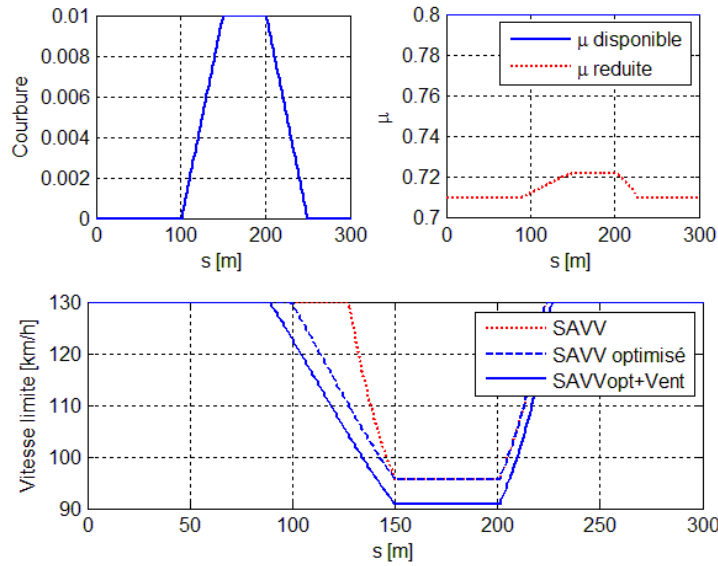


Fig. 6.11 : Considération des efforts de vent

4.1.2. La visibilité atmosphérique

La relation entre la vitesse et la distance de visibilité atmosphérique est décrite par la condition-1 présentée dans le paragraphe (3.4). Cette condition nous permet d'écrire la relation suivante :

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v \leq d_{vis} \quad (\text{Eq. 6.26})$$

Ainsi, dans le cas limite on aura :

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v = d_{vis} \quad (\text{Eq. 6.27})$$

$$\frac{v^2}{2g(\mu \pm p)} + t_{rep} \cdot v - d_{vis} = 0 \quad (\text{Eq. 6.28})$$

En négligeant la déclivité de la route, la résolution de cette équation entraîne le calcul de la vitesse en fonction de la distance de visibilité sous la forme :

$$v = \mu g \left(-t_{rep} + \sqrt{\left(t_{rep}^2 + \frac{2d_{vis}}{\mu g} \right)} \right) \quad (\text{Eq. 6.29})$$

4.2. Condition sur le véhicule

Pour la dynamique du véhicule, nous nous intéressons à l'angle de dérive qui se présente fortement en prenant un virage. Pour assurer la stabilité du véhicule en virage, il est donc nécessaire de déterminer la valeur désirée de l'angle de dérive permettant de produire la trajectoire du virage.

La modélisation du véhicule est indispensable pour comprendre le comportement dynamique du véhicule sur la route. Un modèle dynamique développé par [96] permet d'établir une équation de l'angle de dérive désiré en fonction du braquage désiré (le braquage permettant de négocier le mieux possible la trajectoire d'un virage bien déterminée). L'équation du braquage désiré est sous la forme suivante :

$$\delta_{des} = \frac{l_{av} + l_{ar}}{R_p} + \left(\frac{ml_{ar}C_{\alpha ar} - ml_{av}C_{\alpha av}}{2C_{\alpha av}C_{\alpha ar}(l_{av} + l_{ar})} \right) \frac{v^2}{R_p} \quad (\text{Eq. 6.30})$$

L'équation de l'angle de dérive désiré par le conducteur est donnée par :

$$\alpha_{des} = \frac{l_{ar} - \frac{l_{av}mv^2}{2C_{\alpha ar}(l_{av} + l_{ar})}}{(l_{av} + l_{ar}) + \frac{mv^2(l_{ar}C_{\alpha ar} - l_{av}C_{\alpha av})}{2C_{\alpha av}C_{\alpha ar}(l_{av} + l_{ar})}} \delta_{des} \quad (\text{Eq. 6.31})$$

Ainsi on peut écrire l'angle de dérive en fonction de la vitesse d'avancement du véhicule sous la forme :

$$\alpha_{des} = \frac{1}{R_p} \left(l_{ar} - \frac{l_{av}}{2C_{\alpha ar}(l_{av} + l_{ar})} mv^2 \right) \quad (\text{Eq. 6.32})$$

Pour établir l'équation de la détermination de la vitesse maximale, il faut déterminer la vitesse du véhicule en fonction des différents paramètres. Concernant l'angle de dérive, l'étude faite par [96] permet de définir la vitesse en fonction de ce paramètre. On peut donc écrire :

$$v = \sqrt{\frac{2C_{\alpha ar}(l_{av} + l_{ar})}{ml_{av}}} \sqrt{l_{ar} - R_p \alpha} \quad (\text{Eq. 6.33})$$

Pour que cette équation soit valable et pour assurer la stabilité du véhicule, il y a une condition nécessaire définie par l'inéquation suivante :

$$l_{ar} - R_p \alpha > 0 \quad (\text{Eq. 6.34})$$

Ou encore :

$$\alpha < \frac{l_{ar}}{R_p} \quad (\text{Eq. 6.35})$$

Cette inéquation peut servir pour avoir une information sur le rayon de courbure du virage négocié par le véhicule. Cependant, la bonne estimation de l'angle de dérive du véhicule permettra de calculer le rayon de courbure du virage sachant la mesure de la distance de l'essieu arrière au centre

du gravite du véhicule l_{ar} . En fait, un encadrement de l'angle de dérive entraîne un encadrement du rayon de courbure. Cela représente une méthode d'estimation du rayon de courbure du virage.

4.3. Condition sur le conducteur

La modélisation du conducteur présentée dans le chapitre (4) nous permet de définir le type du conducteur au volant en fonction de son comportement en accélération longitudinale, latérale et son temps de réponse. Les accélérations identifiées du conducteur peuvent servir de données pour ajuster la vitesse en fonction de leur valeur. Cependant, la relation entre la vitesse et le temps de réponse du conducteur peut être déterminée par la condition-2 présentée dans le paragraphe (3.4). Cette condition nous permet d'écrire :

$$\frac{v^2}{2\mu g} + t_{rep} \cdot v \leq 0.56v \quad (\text{Eq. 6.36})$$

Et donc, dans le cas limite on aura :

$$\frac{v^2}{2\mu g} + t_{rep} \cdot v = 0.56v \quad (\text{Eq. 6.37})$$

La résolution de cette équation entraîne le calcul de la vitesse en fonction du temps de réponse du conducteur :

$$v = 2\mu g |0.56 - t_{rep}| \quad (\text{Eq. 6.38})$$

En ce qui concerne l'adhérence mobilisée du conducteur elle est prise en compte lors de l'utilisation de l'équation de la SAVV où nous remarquons l'existence des coefficients λ_{lat} et λ_{lon} qui représentent la portion de l'adhérence mobilisée par le conducteur.

4.4. Condition sur l'infrastructure

Parmi les caractéristiques de l'infrastructure nous pouvons étudier l'influence du dévers, la courbure, l'adhérence, la pente, l'accotement et l'angle saillant sur le calcul de la vitesse limite.

4.4.1. Le devers, la courbure et l'adhérence

La description de la route développée par la NHTSA permet de définir la vitesse en fonction du devers, la courbure et l'adhérence. Ce profil de vitesse maximale nous permet d'étudier la variation de la vitesse en fonction des différents paramètres.

$$V = \sqrt{\frac{g}{\rho_{route}} \left(\frac{\phi_{route} + \mu}{1 - \phi_{route}\mu} \right)} \quad (\text{Eq. 6.39})$$

4.4.2. La pente

L'équation de la SAVV prend en considération les caractéristiques géométriques de la route lors du calcul de la vitesse limite. Nous pouvons donc en servir pour déterminer la vitesse maximale en fonction de la pente de la route.

$$\begin{cases} \theta_{route} > 0 : V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 - \frac{H}{L_{av}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon}\mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat}\mu_{max} - \phi_{route} \right) \\ \theta_{route} < 0 : V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 + \frac{H}{L_{ar}} \theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon}\mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat}\mu_{max} - \phi_{route} \right) \end{cases} \quad (\text{Eq. 6.40})$$

4.4.3. L'accotement et l'angle saillant

La relation entre la vitesse et la distance de visibilité géométrique est décrite par la condition-1 présentée dans le paragraphe (3.4). Cette condition nous a permis d'écrire l'équation (Eq. 6.16). La résolution de cette équation entraîne le calcul de la vitesse en fonction des caractéristiques géométriques de la route.

Profil en latéral : virage

Dans ce cas, la distance de la visibilité géométrique est donnée par la relation :

$$d_{vis} = \sqrt{8R(2 + la)} \quad (\text{Eq. 6.41})$$

Supposons dans ce cas que le temps de réponse du conducteur est égal à 2 secondes, l'équation (6.16) devient dans le cas limite :

$$\frac{v^2}{2\mu g} + 2v = \sqrt{8R(2 + la)} \quad (\text{Eq. 6.42})$$

La solution de l'équation (Eq. 6.27) est sous la forme :

$$v = -2\mu g + \sqrt{4\mu^2 g^2 + 4\sqrt{2}\mu g \sqrt{R(2 + la)}} \quad (\text{Eq. 6.43})$$

L'équation ci-dessus permet de calculer la vitesse limite en fonction de l'accotement de la route.

Profil en longitudinal : angle saillant

Dans ce cas, l'équation reliant la distance d'arrêt à la distance de visibilité géométrique est donnée par la relation :

$$\frac{v^2}{2\mu g} + 2v = \sqrt{2R_m}(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_v}) \quad (\text{Eq. 6.44})$$

Et donc la solution devient :

$$v = 2\sqrt{2R_m}\mu g(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_v}) \quad (\text{Eq. 6.45})$$

Cette équation permet de calculer la vitesse limite en fonction du rayon de la montée.

4.5. Sensibilité de la vitesse aux variations des paramètres

Le paragraphe précédent nous a permis de déterminer le lien entre les différents paramètres et la vitesse limite. Cependant, il existe encore un grand nombre de paramètres à étudier, ce qui est très complexe. Pour cela, nous allons définir parmi ces paramètres, ceux qui sont les plus influents et ont

un effet majeur sur le calcul de la vitesse. Pour chacun des cas précédents (véhicule, infrastructure, environnement), nous allons donc étudier l'influence de la variation de chaque paramètre sur la variation de la vitesse. Ce qui peut nous permettre de définir la sensibilité de la vitesse vis-à-vis ces paramètres.

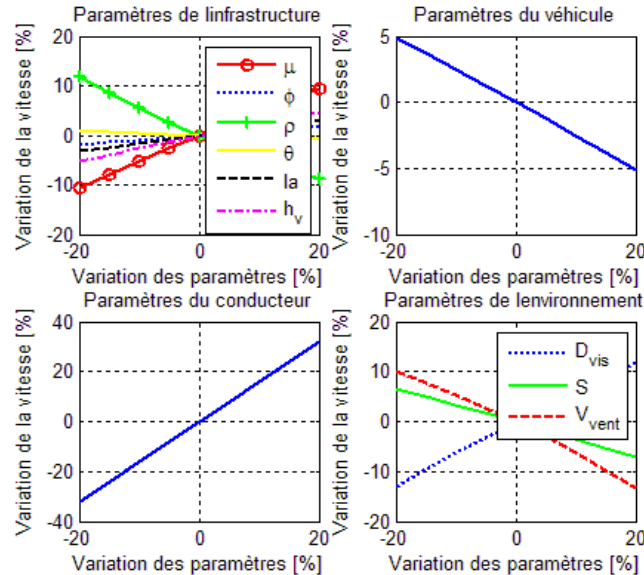


Fig. 6.12 : Sensibilité de la vitesse en fonction des différents paramètres

La (Fig. 6.12) représente le pourcentage de variation de la vitesse en fonction du pourcentage de variation des différents paramètres définis précédemment. La figure se divise en quatre parties correspondantes aux paramètres de l'infrastructure, le véhicule, le conducteur et l'environnement. Concernant les paramètres de l'infrastructure, nous remarquons que la courbure est le plus influent sur la vitesse. Une augmentation de 20 % de la courbure entraîne une nécessité de diminuer la vitesse de 10 % et inversement. Les autres paramètres se suivent après la courbure du plus au moins influent : l'adhérence disponible, la hauteur visée sur un angle saillant, la largeur de l'accotement le devers et la pente.

Les paramètres de l'environnement étudiés sont la distance de visibilité atmosphérique et les caractéristiques du vent (vitesse et surface d'impact). Ces paramètres se classent du plus influent, la distance de visibilité, au moins influent, la surface d'impact. Concernant les paramètres du véhicule et le conducteur, nous nous sommes limités à l'angle de dérive comme étant un indicateur de stabilité du véhicule sur la route et le temps de réponse pour le véhicule et le conducteur respectivement.

4.6. Synthèse

L'étude de sensibilité présentée dans le paragraphe précédent a pour but de définir les paramètres les plus importants à introduire dans notre système d'alerte. D'après cette étude, nous choisissons parmi ces paramètres la courbure et la largeur d'accotement pour les caractéristiques de l'infrastructure. En effet, l'adhérence disponible et la hauteur visée sont plus importantes sur le calcul de la vitesse que la largeur d'accotement. Cependant, l'adhérence disponible n'est pas déterminée par un modèle mathématique en fonction de la vitesse. Elle peut être déterminée par des méthodes statistiques. La hauteur visée étant un paramètre très variable et dépend fortement du trafic, nous avons donc choisi la largeur de l'accotement à la place de ces deux paramètres.

Concernant les paramètres de l'environnement, nous allons définir la fonction d'ajustement nécessaire pour la distance de visibilité atmosphérique. Par contre, les caractéristiques du vent seront prises en compte par les modifications introduites sur la méthode SAVV pour calculer la vitesse de référence. Ensuite, deux autres fonctions d'ajustement seront introduites pour l'angle de dérive et le temps de réponse du conducteur.

5. Développement des fonctions d'ajustement et des Look-Up-Tables

Le paragraphe précédent a établi les relations entre la vitesse du véhicule et les paramètres influents. Ces relations représentent la vitesse en fonction des conditions de la conduite. Cela peut être important pour décrire la vitesse du véhicule, mais ce qui est plus intéressant, c'est de déterminer la variation de la vitesse en fonction de la variation des différents paramètres. Dans ce cas, nous pourrions comprendre l'influence de ces paramètres sur la vitesse du véhicule, et ensuite on pourra ajuster la vitesse du véhicule selon les caractéristiques actuelles. C'est ce que nous appelons une fonction d'ajustement.

Cette fonction permet donc d'ajuster une grandeur en fonction de certains paramètres. Il existe plusieurs formes de la fonction d'ajustement. Elle peut être considérée comme la variation de la grandeur considérée en fonction de la variation de chaque paramètre, c'est la dérivation relative. La fonction d'ajustement peut aussi être déterminée par la méthode des moindres carrés, cela nécessite d'avoir des mesures statistiques suffisantes pour établir l'équation d'ajustement de chaque paramètre, ce qui n'est pas pratique pour notre étude, et cela est parfois non disponible. D'autres formes de la fonction d'ajustement peuvent être présentées, mais l'objectif de notre étude, c'est d'avoir une forme qui convient à notre application, simple et permettant d'évaluer clairement la variation de la grandeur considérée, la vitesse, en fonction des différents paramètres étudiés. Pour cela nous avons choisi la dérivation relative.

Les fonctions d'ajustements de la vitesse permettent de tracer les LUT qui génèrent les facteurs d'ajustements de chaque paramètre. Ce facteur doit être compris entre 0 et 1. Un facteur égale à 1 signifie que la condition est idéale, la variable considérée ne contribue pas à la diminution de la vitesse limite. Par contre, un facteur égal à 0 désigne théoriquement une mauvaise situation qui exige l'arrêt du véhicule (dans ce cas la vitesse limite sera nulle).

5.1. Vitesse et visibilité atmosphérique

L'équation (Eq. 6.29) permet d'établir la variation de la vitesse en fonction de la variation de la distance de visibilité sous la forme :

$$\frac{\partial v}{\partial d_{vis}} = \frac{1}{\sqrt{t_{rep}^2 + \frac{2d_{vis}}{\mu g}}} \quad (\text{Eq. 6.46})$$

La normalisation de la fonction d'ajustement, nécessite de normaliser le vecteur d'entrée des distances de visibilité. La normalisation de la distance de visibilité sera notée α_{vis} . La fonction d'ajustement normalisée de la vitesse $f_{\alpha_{vis}}$ devient :

$$f_{\alpha_{vis}} = \frac{\partial v}{\partial \alpha_{vis}} = \frac{1}{\sqrt{t_{rep}^2 + \frac{2\alpha_{vis}}{\mu g}}} \quad (\text{Eq. 6.47})$$

La fonction d'ajustement permet de tracer une courbe représentant la valeur du facteur d'ajustement en fonction de la distance de visibilité disponible (Fig. 6.13). Dans la (Fig. 6.13), nous

étudions la distance de visibilité comprise entre 0 mètre et 400 mètres. On suppose que le facteur d'ajustement est nul pour des valeurs de distance de visibilité inférieures à 10 mètres, cela signifie que la vitesse de véhicule doit être nulle, et donc il faut arrêter le véhicule puisque la visibilité n'est pas suffisante. Au delà de 10 mètres, le facteur d'ajustement augmente progressivement avec l'augmentation de la distance de visibilité selon la fonction d'ajustement correspondante jusqu'à atteindre la valeur 1 pour une distance supérieure ou égale à 300 mètres.

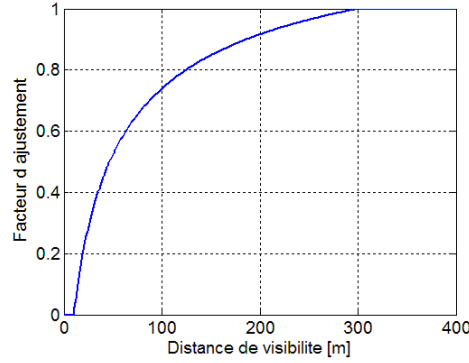


Fig. 6.13 : Facteur d'ajustement pour la distance de visibilité

Cette courbe permet de générer une table de correspondance ayant pour entrée la valeur de la distance de visibilité et pour sortie la valeur du facteur d'ajustement correspondant.

5.2. Vitesse et angle de dérive

Nous intéressons ici à la détermination de la fonction d'ajustement de la vitesse en fonction de l'angle de dérive du véhicule. Cette fonction est donnée en étudiant la variation de la vitesse par rapport à la variation du dérive, nous obtenons alors l'équation suivante :

$$\frac{\partial v}{\partial \alpha} = -\frac{1}{2}R \sqrt{\frac{2C_{\alpha ar}(l_{av}+l_{ar})}{ml_{av}}} \frac{1}{\sqrt{l_{ar}-R\alpha}} \quad (\text{Eq. 6.48})$$

La normalisation de la fonction devient f_{α_α} :

$$f_{\alpha_\alpha} = \frac{\partial v}{\partial \alpha_\alpha} = -\frac{1}{2}R \sqrt{\frac{2C_{\alpha ar}(l_{av}+l_{ar})}{ml_{av}}} \frac{1}{\sqrt{l_{ar}-R\alpha_\alpha}} \quad (\text{Eq. 6.49})$$

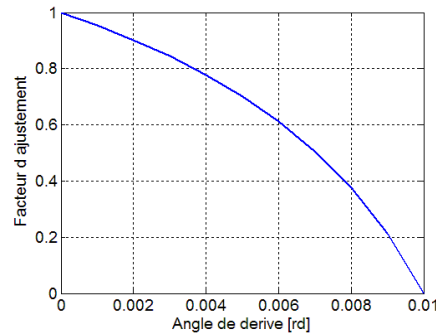


Fig. 6.14 : Facteur d'ajustement pour l'angle de dérive

La (Fig. 6.14) représente la variation du facteur d'ajustement de la vitesse du véhicule en fonction de la variation de l'angle de dérive du véhicule. L'angle de dérive étant important pour connaître l'état de stabilité du véhicule, il est utilisé ici pour ajuster la vitesse en fonction de la

stabilité du véhicule. Nous remarquons d'après la figure que lorsque l'angle de dérive augmente, le facteur d'ajustement diminue, ce qui signifie que la vitesse du véhicule doit aussi diminuer pour éviter une situation de conduite critique. Nous considérons sur cette figure un intervalle compris entre 0 et 0.01 rad pour l'angle de dérive. En effet nous supposons que pour des valeurs de dérive supérieure à 0.01 rad, il faut arrêter le véhicule puisque la situation devient dangereuse.

5.3. Vitesse et visibilité géométrique

La visibilité géométrique nous permet d'étudier la variation de la vitesse en fonction de la variation de la géométrie de l'infrastructure. Par exemple, on peut considérer le cas étudié en profil latéral : le virage. Dans ce cas, nous avons pu définir dans le paragraphe (4.4.3) la relation entre la vitesse du véhicule et l'accotement par l'équation (Eq. 6.43). Cette équation peut servir à écrire la variation de la vitesse en fonction de la variation de l'accotement sous la forme :

$$\frac{\partial v}{\partial acc} = \mu g \sqrt{2} \frac{1}{R} \frac{1}{\sqrt{\mu g + \sqrt{2} \mu g \frac{2acc}{R}}} \quad (\text{Eq. 6.50})$$

La fonction d'ajustement normalisée $f_{\alpha_{acc}}$ devient :

$$f_{\alpha_{acc}} = \frac{\partial v}{\partial \alpha_{acc}} = \mu g \sqrt{2} \frac{1}{R} \frac{1}{\sqrt{\mu g + \sqrt{2} \mu g \frac{2acc}{R}}} \quad (\text{Eq. 6.51})$$

L'influence de la visibilité géométrique sur la vitesse du véhicule ou plus précisément, l'influence de l'accotement de la route sur la vitesse d'avancement du véhicule est représentée par la (Fig. 6.15). Cette figure montre la variation du facteur d'ajustement pour une variation de l'accotement de la route entre 0 mètre et 3 mètres. Ce facteur est compris entre 0 et 1, on suppose que pour un accotement inférieur à 0.5 mètre la vitesse du véhicule doit être réduite à la moitié de la vitesse normale pour assurer une conduite sécurisée et éviter toute sortie de voie. Entre 0.5 mètre et 2 mètres, le facteur d'ajustement augmente progressivement en fonction de la valeur de l'accotement suivant la fonction d'ajustement correspondante. Ce facteur atteint la valeur 1 au delà de 2 mètres, ce qui signifie que la situation est normale et n'exige pas la réduction de la valeur de la vitesse du véhicule. Cette figure servira aussi pour créer une table de correspondance pour l'accotement de la route.

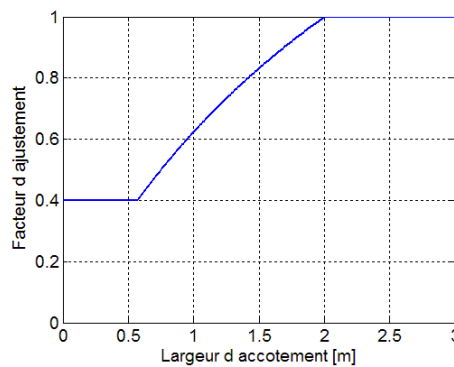


Fig. 6.15 : Facteur d'ajustement pour la largeur de l'accotement

5.4. Vitesse et rayon de courbure

Pareillement au paragraphe précédent, nous pouvons tracer la LUT de la variation de la vitesse en fonction de la variation de la courbure de la route. Nous nous limitons à un intervalle entre 0 et

0.05 pour la courbure ce qui est suffisant pour englober toutes les virages. D'après la (Fig. 6.16), nous trouvons que le facteur d'ajustement diminue lorsque la courbure augmente, ce qui explique bien la nécessité de diminuer la vitesse en virage.

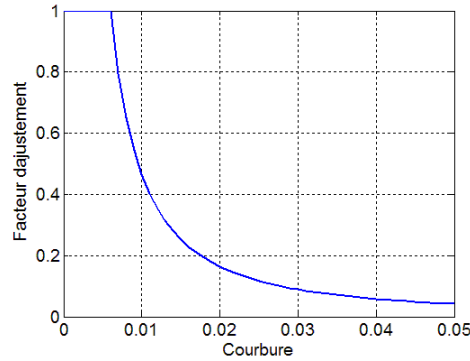


Fig. 6.16 : Facteur d'ajustement pour la courbure

5.5. Vitesse et temps de réponse

De même, pour le temps de réponse du conducteur, nous pouvons écrire la fonction d'ajustement normalisée de la vitesse de la manière suivante :

$$\frac{\partial v}{\partial t_{rep}} = -2\mu g \quad (\text{Eq. 6.52})$$

Nous remarquons que cette équation ne peut pas servir comme fonction d'ajustement permettant de définir un facteur d'ajustement en fonction d'un temps de réponse donné. Il est donc important d'utiliser l'équation (Eq. 6.38) qui permet aussi de calculer la vitesse du véhicule en fonction du temps de réponse du conducteur. La variation de la vitesse en fonction de la variation du temps de réponse est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial v}{\partial t_{rep}} = \mu g \left(-1 + \frac{t_{rep}}{\sqrt{t_{rep}^2 + \frac{2d_{vis}}{\mu g}}} \right) \quad (\text{Eq. 6.53})$$

Et donc la normalisation de la fonction sera $f_{\alpha_{trep}}$:

$$f_{\alpha_{trep}} = \frac{\partial v}{\partial \alpha_{trep}} = \mu g \left(-1 + \frac{\alpha_t}{\sqrt{\alpha_t^2 + \frac{2d_{vis}}{\mu g}}} \right) \quad (\text{Eq. 6.54})$$

En étudiant l'influence du temps de réponse du conducteur sur la vitesse du véhicule, on remarque d'après la (Fig. 6.17) que pour un temps de réponse plus petit (le conducteur est capable d'agir rapidement) la situation n'exige pas de réduire la vitesse du véhicule. Un temps de réponse inférieur à 1.5 secondes peut être considéré petit. Entre 1.5 et 2.5 secondes, la valeur de la vitesse change en fonction de la valeur du temps de réponse selon la fonction d'ajustement correspondante pour aider le conducteur à éviter une situation critique. Un conducteur avec un temps de réponse supérieur à 2.5 secondes est considéré comme un conducteur qui amplifie la possibilité de risque, pour cela il est recommandé de maintenir la vitesse du véhicule à une valeur inférieure à la valeur d'une conduite normale de 0.4 %.

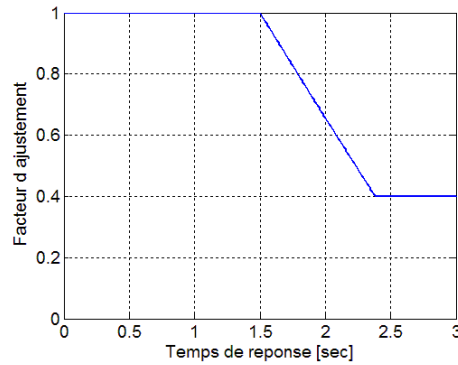


Fig. 6.17 : Facteur d'ajustement pour le temps de réponse

6. Algorithme principal et simulation de quelques scenarios

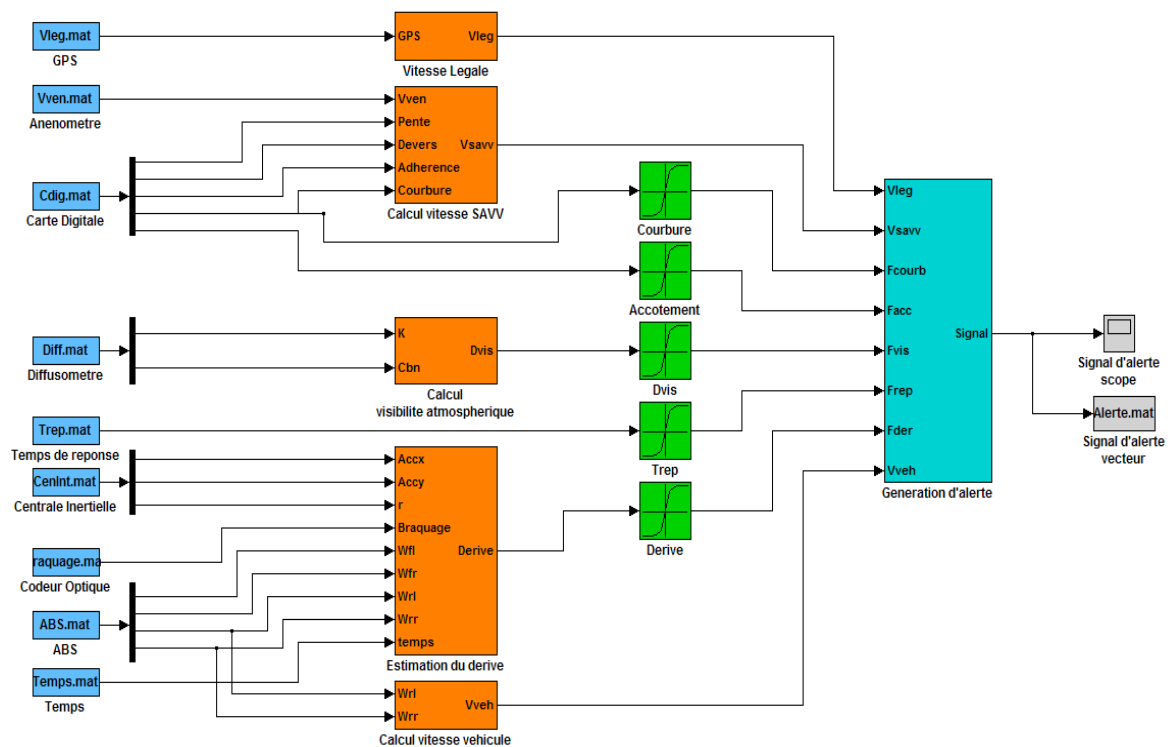


Fig. 6.18 : Algorithme de simulation

Le fonctionnement principal du système d'alerte a été présenté dans l'introduction du chapitre. Nous présentons dans ce paragraphe l'algorithme de calcul sous SimuLink/MatLab. Le calcul s'effectue en quatre étapes principales :

- Etape 1 : nous mesurons les grandeurs nécessaires en utilisant les capteurs correspondants.
- Etape 2 : nous déterminons les valeurs des paramètres considérés dans notre étude. Cela se fait par des méthodes de calcul direct ou d'estimation.
- Etape 3 : nous introduisons les valeurs des paramètres dans les LUT pour déterminer les facteurs d'ajustement.
- Etape 4 : finalement, nous calculons la vitesse limite en fonction des facteurs d'ajustement, de la vitesse SAVV et la vitesse légale.

$$V_{SAVV,Aj} = V_{SAVV} \times \min(f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (\text{Eq. 6.55})$$

$$V_{limite} = \min(V_{SAVV,Aj}, V_{legale}) \quad (\text{Eq. 6.56})$$

Le choix de notre modèle de calcul du profil de la vitesse minimale a été basé sur le modèle développé par [109]. Dans ce modèle, le profil de la vitesse maximale a été déterminé en considérant la vitesse V85 comme vitesse de référence et les facteurs d'ajustement ont été calculés par des mesures statistiques et seront ensuite multipliés par la vitesse V85. Nous supposons que ces deux choix représentent certains inconvénients que nous avons modifiés :

- Le calcul des facteurs d'ajustement a été fait par des modèles mathématiques plus profonds
- La vitesse V85 a été remplacée par la vitesse SAVV qui détermine la vitesse limite plus réellement
- La multiplication des facteurs d'ajustement les uns par les autres pourrait aboutir à une vitesse quasi nulle, ce qui n'est pas réaliste. Nous avons donc remplacé cette multiplication par la fonction *min*. En effet, cette fonction simplifie la fusion des données et ne prend pas en compte le couplage entre les différents paramètres ce qui nécessite plus de calcul et d'autres considérations.

Pour vérifier le fonctionnement du système, nous le testons dans quelques conditions de conduite. Pour cela, nous choisissons 6 scénarios principaux :

- Une trajectoire en conduite normale (sans sollicitation)
- Une trajectoire sollicitant les paramètres de l'environnement
- Une trajectoire sollicitant le temps de réponse du conducteur
- Une trajectoire sollicitant l'angle de dérive
- Une trajectoire sollicitant les paramètres de l'infrastructure
- Une trajectoire générale sollicitant tous les paramètres

A noter que la vitesse du véhicule est choisie comme une entrée bruitée pour que nous puissions avoir quelques alertes. Une alerte est présentée par la valeur 1 tandis que la conduite sans alerte est présentée par 0.

Scenario 1 : pas de sollicitation

Dans ce cas, nous testons le système d'alerte sur une trajectoire rectiligne sans aucune perturbation. La trajectoire est présentée par la (Fig. 6.19). La (Fig. 6.20) représente alors les différentes vitesses calculées et la signalé d'alerte.

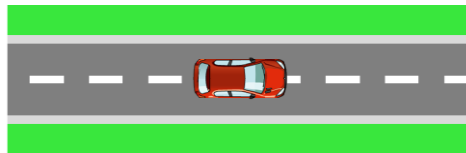


Fig. 6.19 : Trajectoire

Nous remarquons d'après cette figure que nous avons obtenu deux alertes. Cela est dû à la vitesse pratiquée.

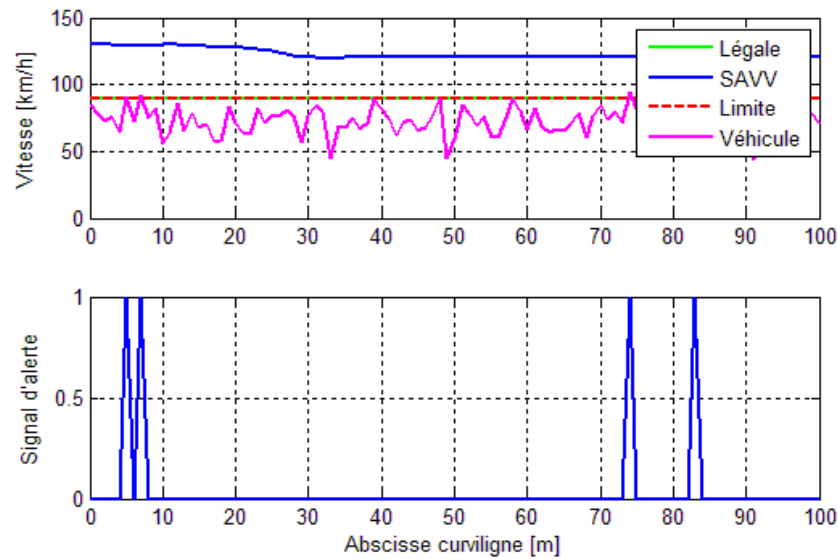


Fig. 6.20 : Vitesse et signal d'alerte

Scenario 2 : sollicitation des paramètres de l'environnement

Ce scénario consiste à solliciter les paramètres de l'environnement. En effet, nous allons diviser la trajectoire en cinq parties : la première sera pour une conduite normale, la deuxième teste le système d'alerte dans le cas d'une mauvaise visibilité, la troisième sert à étudier l'influence du vent, la quatrième présentera les résultats dans le cas d'un couplage entre la visibilité et le vent et enfin nous revenons à la conduite normale.

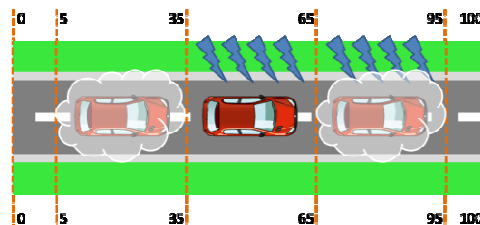


Fig. 6.21 : Trajectoire

Les résultats obtenus sont présentés sur la (Fig. 6.22). Nous remarquons sur les différentes parties que la vitesse limite diminue selon les contraintes ajoutées.

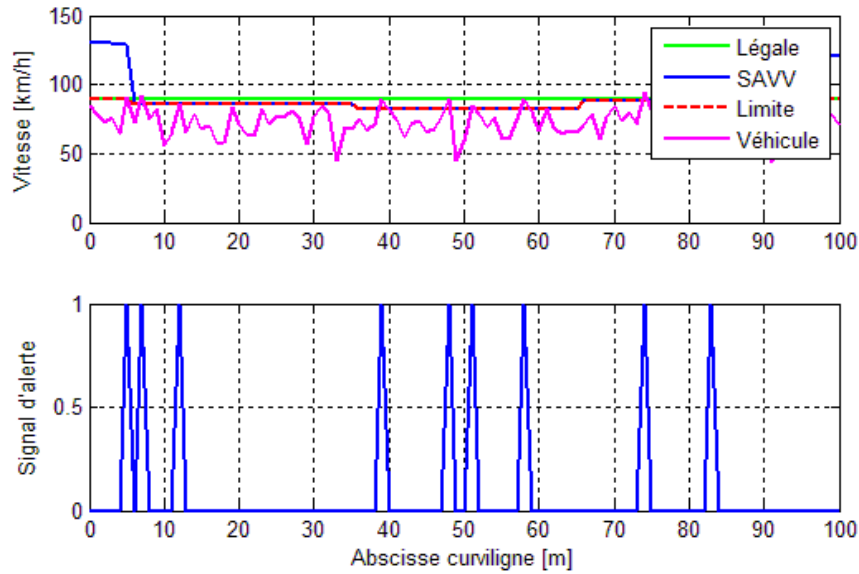


Fig. 6.22 : Vitesse et signal d'alerte

Scenario 3 : sollicitation du conducteur

Le conducteur a été considéré par son temps de réponse. La trajectoire dédiée pour la sollicitation du conducteur se compose de deux parties normales et une partie intermédiaire où le temps de réponse est plus faible (Fig. 6.23).

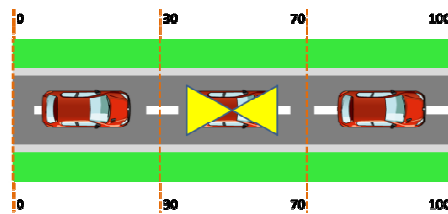


Fig. 6.23 : Trajectoire

La (Fig. 6.24) montre que sur la partie où le temps de réponse est faible, la vitesse limite est devenue plus petite. Ce qui explique l'existence d'un nombre plus grand d'alerte sur cette partie.

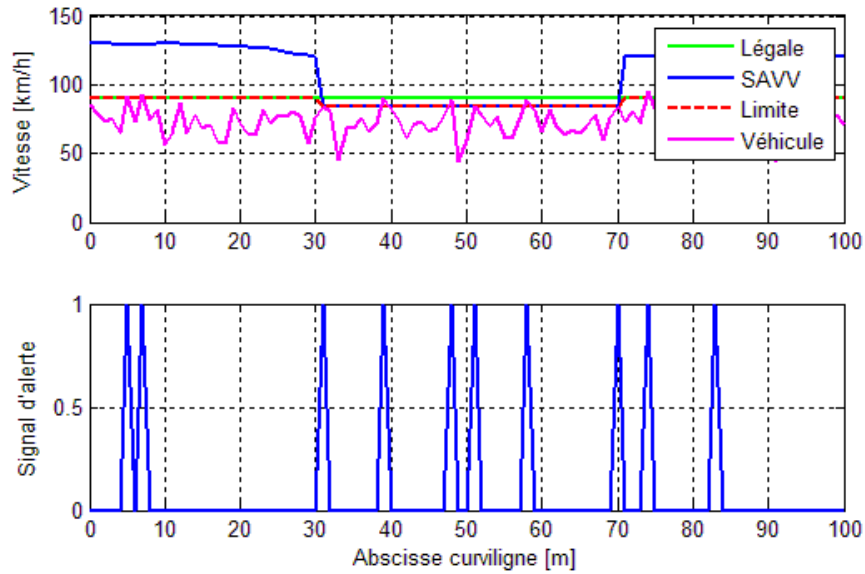


Fig. 6.24 : Vitesse et signale d'alerte

Scenario 4 : sollicitation de dérive

En modifiant les paramètres dynamiques du véhicule, nous pouvons augmenter l'angle de dérive et ainsi nous vérifiant que le système d'alerte répond bien à la variation de l'angle de dérive.

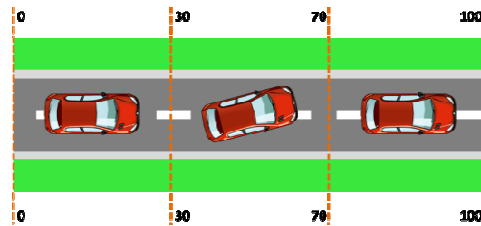


Fig. 6.25 : Trajectoire

Sur la (Fig. 6.26) nous remarquons que sur la partie de la trajectoire où l'angle de dérive est plus grand, la vitesse limite est devenue plus faible.

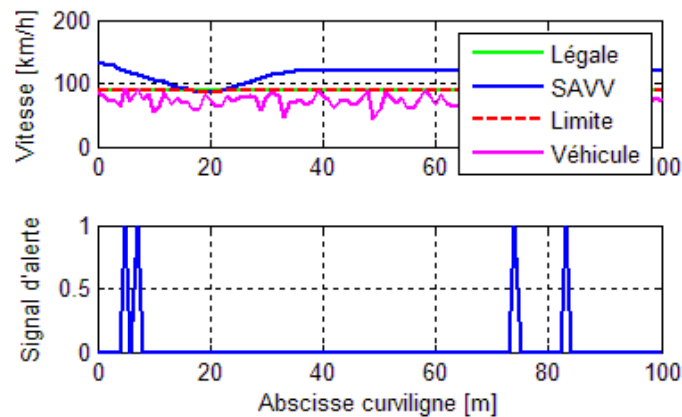


Fig. 6.26 : Vitesse et signale d'alerte

Scenario 5 : sollicitation des paramètres de l'infrastructure

Ce scénario consiste à étudier le système d'alerte en sollicitant les paramètres de l'infrastructure : la courbure et la largeur de l'accotement. Pour cela nous divisons la trajectoire en cinq parties : une ligne droite avec accotement, un virage avec accotement, une ligne droite sans accotement, un virage sans accotement et ensuite une ligne droite avec accotement.

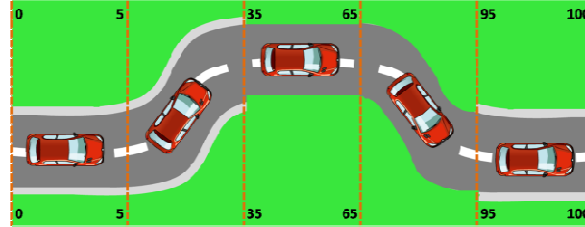


Fig. 6.27 : Trajectoire

Les résultats de la simulation de cette trajectoire sont représentés par la (Fig. 6.28) où nous remarquons comment la vitesse limite diminue en virage, en ligne droite sans accotement et aussi en virage sans accotement.

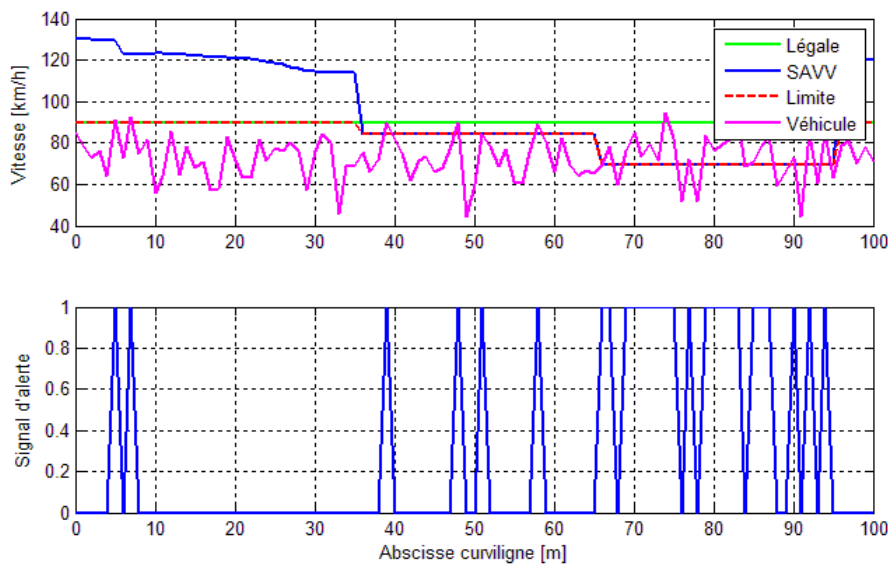


Fig. 6.28 : Vitesse et signale d'alerte

Scenario 6 : couplage de toutes les sollicitations

Enfin, et pour vérifier que le système est valable dans toutes les conditions de conduite, nous simulons un virage sous les effets du vent, du dérive, d'une mauvaise visibilité, d'un largeur d'accotement faible, d'un temps de réponse faible et d'une situation de dérive.

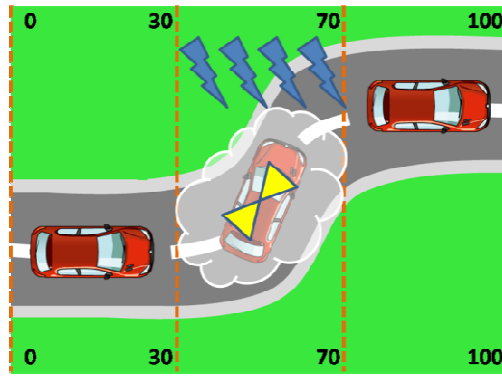


Fig. 6.29 : Trajectoire

Sous ces conditions, les résultats de l'estimation sont représentés par la (Fig. 6.30) où nous voyons les alertes enregistrées sur ce virage.

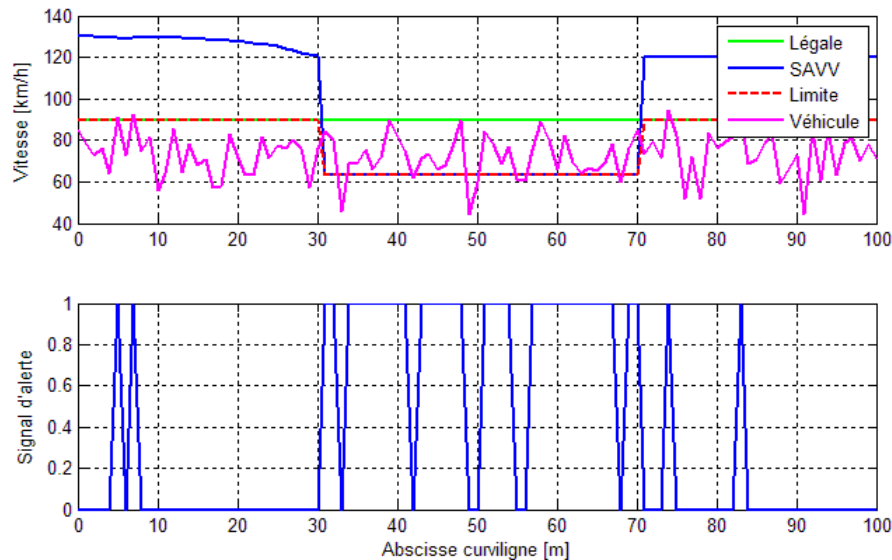


Fig. 6.30 : Vitesse et signale d'alerte

7. Conclusion

La conduite en sécurité est essentielle dans la recherche concernant la sécurité routière. Il est donc impératif de l'assurer pour éviter tout type d'accident ou situation critique. La vitesse du véhicule est le paramètre le plus important qui peut caractériser la conduite d'un véhicule : elle va déterminer la gravité d'un accident, permettre au conducteur de réagir... Pour cela, notre but était de limiter la vitesse du véhicule tout en prenant en considération les différentes conditions qui peuvent influencer sur cette vitesse : les conditions atmosphériques, les caractéristiques de l'infrastructure, le conducteur et la dynamique du véhicule.

Dans ce chapitre, nous avons pu présenter la partie essentielle de la nouvelle approche développée pour déterminer la vitesse limite du véhicule. C'est la partie concernant le développement des tables de correspondance (LUT) permettant de choisir le facteur d'ajustement approprié pour une situation de conduite donnée, ainsi que le fonctionnement du système et la simulation de quelques scénarios types.

CHAPITRE 7 : RISQUE DE COLLISION ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE

1. Introduction

L'objectif du chapitre précédent était l'étude de l'état de la conduite et le développement d'un système d'alerte permettant de signaler au conducteur que sa vitesse est supérieure à la vitesse limite. La validation du système développé a été faite précédemment en simulant plusieurs scénarios sous SimuLink/MatLab. Cependant, cette validation n'est pas suffisante pour rassurer le bon fonctionnement du système, pour cela nous présenterons dans ce chapitre une validation expérimentale ainsi qu'une réflexion sur la détermination de la possibilité de collision lorsque le conducteur ne réagit pas avec l'alerte.

2. Risque de collision lors d'une sortie de voie

Le système développé sert à signaler au conducteur qu'il y a une situation critique et donc il faut diminuer rapidement sa vitesse. Cependant, si dans une certaine condition le conducteur ne réagit pas avec cette alerte et donc ne diminue pas la vitesse de son véhicule, il y aura ainsi une possibilité d'avoir un accident selon le trafic routier et la situation du véhicule sur la route. Pour cela, il sera important de déterminer cette possibilité afin de définir l'action suivante à faire pour éviter une telle collision possible.

Dans ce paragraphe, nous allons étudier un scénario de sortie de voie. Ce scénario suppose que le conducteur n'a pas réagi à l'alerte et que son véhicule a subi une sortie de voie. Ainsi, nous allons calculer la possibilité de choc avec un autre véhicule évoluant sur la deuxième voie.

2.1. Description du système

Le système considéré est celui d'une route à deux voies dans le même sens. La voie 2 a un débit Q_2 , les véhicules, de longueur L_{V2} , sont supposés rouler à la vitesse moyenne V_2 . Une interdistance peut donc être calculée, elle sera notée D_2 . Les conducteurs de cette voie ont un temps de réaction T_{R2} .

Sur la voie 1 évolue un véhicule, de longueur L_{V1} , et qui roule à la vitesse V_1 supposée inférieure à V_2 , qui est soumis à une perturbation latérale. Suite à cette perturbation, il se déporte sur la voie 2 (Fig. 7.1). Le conducteur réagit au bout d'un temps T_{R1} et corrige la direction de son véhicule pour revenir sur sa voie. L'incursion dans la deuxième voie aura duré T_1 .

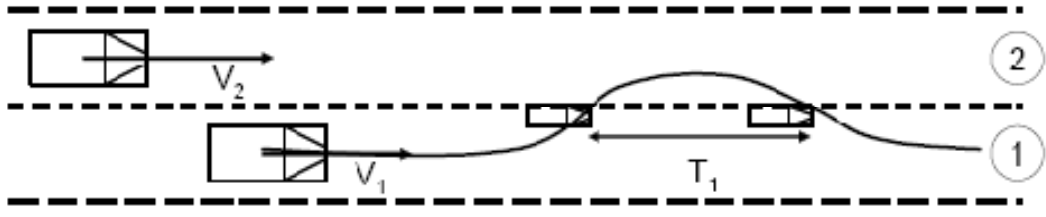


Fig. 7.1 : Scenario de sortie de voie

Le but est d'évaluer en fonction de la durée de l'incursion et des caractéristiques du système, la possibilité d'un choc avec un véhicule de la voie 2 lors de ce départ.

Deux hypothèses peuvent être faites sur la réaction du conducteur de la voie 2. Dans un premier cas, nous supposons que le conducteur de la voie 2 ne réagit pas. Il ne modifiera donc pas sa vitesse. Dans le deuxième cas, nous supposons que le conducteur décide, au bout d'un temps de réaction T_{R2} , de décélérer, avec une accélération longitudinale γ_2 pour éviter la collision. Il décélérera jusqu'à atteindre la vitesse V_1 .

Cas 1 : Pas de modification de la vitesse

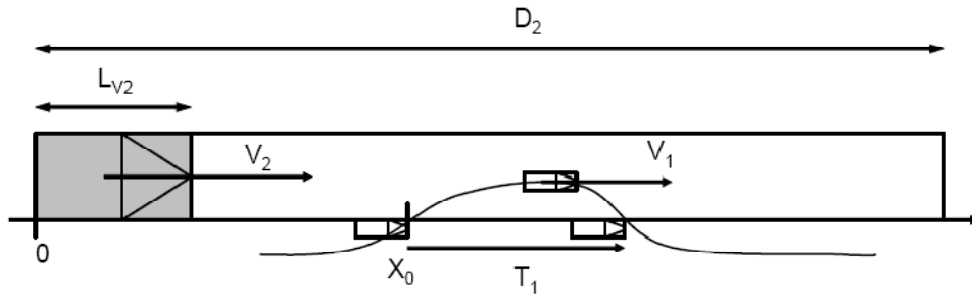


Fig. 7.2 : Scenario de sortie de voie sans modification de vitesse

Le véhicule de la voie 1 se déporte, suite à une perturbation latérale et entre dans la voie 2 à l'abscisse X_0 . Il peut rentrer dans la voie 2 à n'importe quelle abscisse entre 0 et D_2 (Fig. 7.2). Ce sera sur cet espace que nous étudierons les probabilités de chocs. Il y a alors deux possibilités de chocs. Dans le premier cas, le véhicule 1 rentre directement en collision avec le véhicule 2. Pour cela, il faut que X_0 soit inférieur à $L_{V1} + L_{V2}$.

Dans ce premier cas, la possibilité de choc est donc :

$$P_1 = \frac{L_{V1} + L_{V2}}{D_2} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

Sur l'espace restant, $D'_2 = D_2 - (L_{V1} + L_{V2})$, le véhicule 1 peut subir une collision arrière au plus tard, au moment de sa sortie de la voie 2. A ce moment, l'abscisse de l'arrière du véhicule 1 sera $X_0 + V_1 T_1 - L_{V1}$. L'avant du véhicule 2 est alors à $L_{V2} + V_2 T_1$. En écrivant l'égalité de ces deux positions, nous obtenons la condition sur X_0 d'un choc arrière : $X_0 = L_{V1} + L_{V2} + (V_2 - V_1) T_1$. Compte-tenu du début de la zone à $L_{V1} + L_{V2}$, nous obtenons la possibilité d'un choc dans ce cas :

$$P_2(T_1) = \frac{(V_2 - V_1) T_1}{D_2 - (L_{V1} + L_{V2})} \quad (\text{Eq. 7.2})$$

Cette expression est limite si la durée de l'incursion du véhicule 1 dans la voie 2 est supérieure à un temps maximal T_{max1} . La possibilité sur l'ensemble du domaine D_2 pour tous les cas est donnée par :

$$P_{cas1}(T_1) = P_1 + (1 - P_1)P_2(T_1) \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Cas 2 : Prise en compte de la réaction du conducteur

Nous supposons qu'au bout d'un temps T_{R2} suivant l'insertion du véhicule 1 dans la voie 2, le conducteur du véhicule 2 freine avec une décélération (notée positivement) γ_2 . Cette décélération doit lui permettre d'éviter la collision et, au plus, de diminuer sa vitesse jusqu'à celle du véhicule 1.

La première situation reste identique, la possibilité de choc direct est inchangée avec :

$$P_1 = \frac{L_{V1} + L_{V2}}{D_2} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

Pour un temps d'incursion T_1 inférieur à T_{R2} , la possibilité d'un choc reste identique :

$$P_2(T_1) = \frac{(V_2 - V_1)T_1}{D_2 - (L_{V1} + L_{V2})} \quad (\text{Eq. 7.5})$$

Lorsque la durée d'incursion, T_1 , est supérieure à T_{R2} le conducteur de la deuxième file se met alors à freiner. La position de l'arrière du véhicule 1 au moment de sa sortie de la voie 2 est : $X_0 + V_1T_1 - L_{V1}$. De la même façon, la position de l'avant du véhicule 2 est (pour $T_1 \geq T_{R2}$) : $L_{V2} + V_2T_1 - \frac{\gamma_2}{2}(T_1 - T_{R2})^2$. En écrivant l'égalité de ces deux positions, nous obtenons la relation sur la position minimal $X_0 = L_{V1} + L_{V2} + (V_2 - V_1)T_1 - \frac{\gamma_2}{2}(T_1 - T_{R2})^2$. Dans la zone où le véhicule freine, nous obtenons alors la possibilité de choc :

$$P_3(T_1) = \frac{(V_2 - V_1)(T_1 - T_{R2}) - \frac{\gamma_2}{2}(T_1 - T_{R2})^2}{D_2 - (L_{V1} + L_{V2} + (V_2 - V_1)T_{R2})} \quad (\text{Eq. 7.6})$$

Finalement, lorsque le véhicule 2 a atteint la vitesse du véhicule 1, la possibilité de choc n'évolue plus. De plus, nous supposons qu'à ce moment là, les autres véhicules, de la file 2, ont amortis la décélération du véhicule 2 suite à l'insertion du véhicule 1 sans créer d'accident. A ce moment là, T_1 vaut $T_L = T_{R2} + \frac{V_2 - V_1}{\gamma_2}$ et nous avons :

$$P_L = \frac{\frac{(V_2 - V_1)^2}{2\gamma_2}}{D_2 - (L_{V1} + L_{V2} + (V_2 - V_1)T_{R2})} \quad (\text{Eq. 7.7})$$

La possibilité d'un choc est décrite par le système suivant :

$$P_{cas2}(T_1) = \begin{cases} \text{si } T_1 < T_{R2} \\ P_1 + (1 - P_1)P_2(T_1) \\ \text{si } T_1 \geq T_{R2} \text{ et } T_1 < T_L \\ P_1 + (1 - P_1)P_2(T_R) + (1 - P_1)(1 - P_2(T_R))P_3(T_1) \\ \text{si } T_1 \geq T_L \\ P_1 + (1 - P_1)P_2(T_R) + (1 - P_1)(1 - P_2(T_R))P_3(T_L) \end{cases} \quad (\text{Eq. 7.8})$$

2.2. Evaluation

Cas Pratique

On suppose que les véhicules de la voie 1 circulent à une vitesse moyenne de 90km/h (soit 25m/s), et sont de longueur 5m. Les véhicules de la voie 2 circulent à une vitesse de 130km/h (soit 36m/s) avec une interdistance D_2 de 60m. La longueur des véhicules est de 5m, le temps de réaction des conducteurs de la voie 2 de 1.2s et ils s'autorisent un freinage γ_2 de 4m/s². Sous ces conditions, nous obtenons les courbes présentées sur la (Fig. 7.3). La possibilité de choc dans le cas 1 atteint 1 pour un temps d'incursion légèrement supérieur à 4.5s. Pour le cas 2, la possibilité maximale de choc est de l'ordre de 0.65 et est atteinte pour un temps de l'ordre de 3.8s. Dans cette configuration, une incursion dans la voie adjacente présente un risque minimal assez important dont l'ordre de grandeur est de 0.16. Si les véhicules de la voie 2 avaient été à une distance réglementaire, de 2s, la possibilité minimale de choc serait toujours importante (plus de 0.1). En supposant les véhicules de la voie 2 à distance d'arrêt (de type mur de brique, et pour un freinage de 8m/s²), nous obtenons une possibilité minimale de 0.08.

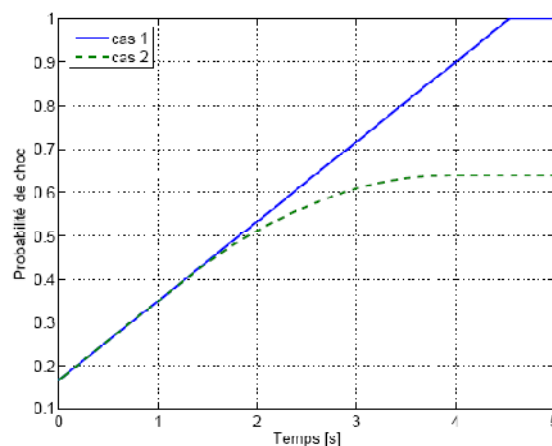


Fig. 7.3 : Variation de la probabilité en fonction du temps

Remarques

Nous pouvons inverser les rapports de vitesse de véhicule en ne considérant non plus le véhicule de la voie 2 suivant le véhicule de la voie 1, mais celui le précédent. Dans ce cas, nous obtenons les mêmes résultats en prenant en compte une accélération du véhicule de la voie 2.

Dans un cas limite, il est tout à fait possible de considérer que les deux véhicules évoluent à la même vitesse. Dans ce cas, seule la possibilité de choc direct est non nulle.

3. Introduction de la possibilité de collision dans le système d'alerte

La sortie de route est principalement liée à un excès de vitesse au delà de la limite qui correspond aux caractéristiques de la route, du véhicule, et de l'environnement. Le travail établi jusqu'à présent a été basé sur l'étude de la sortie de voie due à la vitesse. Cependant, dans certains de cas nous pouvons avoir des sorties de route sans aucun excès de vitesse. Dans ce cas, le système d'alerte établi ne lancera pas une alerte au conducteur puisqu'il ne détecte pas un excès de vitesse. Afin de prendre en considération cette situation qui est fortement critique, nous allons intégrer le calcul de la possibilité de collision dans le système d'alerte. Cette possibilité servira comme un nouveau facteur d'ajustement de la vitesse lors de la détection d'une sortie de voie. D'ailleurs la

détection de la sortie de voie peut être basée sur la mesure de l'angle de dérive. Dans le cas d'une dérive supérieure à celle désirée pour suivre parfaitement la trajectoire, nous pouvons noter une situation critique de sortie de voie.

3.1. Développement d'une LUT correspondant à la possibilité de collision

L'objectif principal d'une LUT est de fournir un facteur d'ajustement normalisé qui sera multiplié par la vitesse de référence afin de l'ajuster à la condition de la possibilité. La possibilité de collision calculée sera toujours une valeur normalisée entre 0 et 1. Nous pouvons donc la considérer comme étant un facteur d'ajustement de la vitesse. La LUT correspondante à la possibilité aura la courbe suivante :

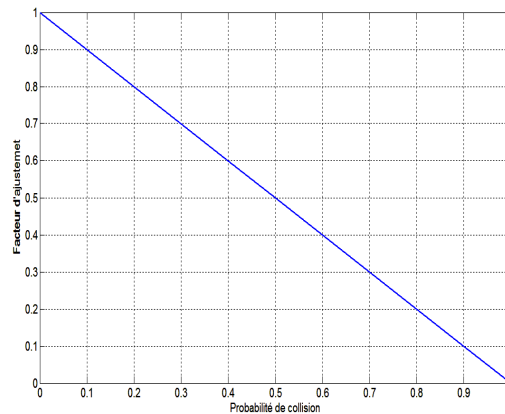


Fig. 7.4 : Facteur d'ajustement en probabilité

3.2. Ajout de la possibilité de collision à l'algorithme principal du système

L'aspect modulaire, du système d'alerte développé, nous permet d'ajouter le bloc de possibilité de collision sans trop de modification et sans jamais toucher les autres blocs concernant les autres caractéristiques prises en compte pour le calcul de la vitesse limite.

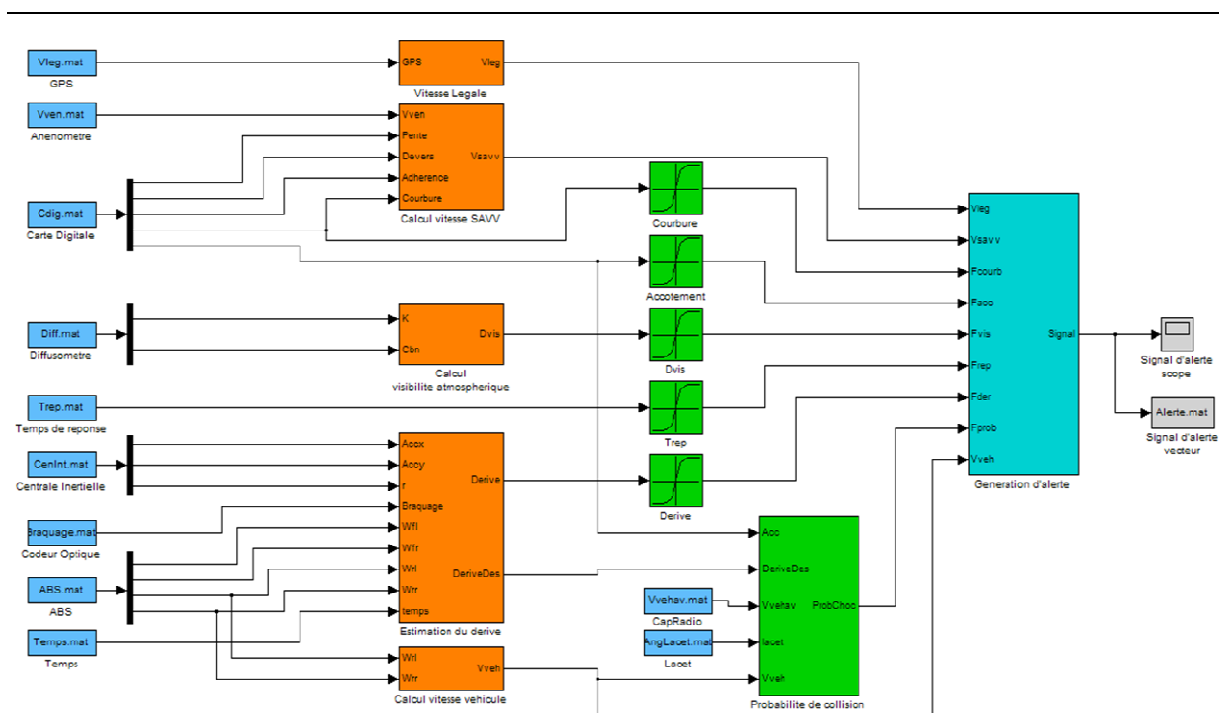


Fig. 7.5 : Prise en compte de la possibilité de collision dans l'architecture du système d'alerte

La (Fig. 7.5) représente la nouvelle architecture du système d'alerte. Une partie essentielle est ajoutée pour calculer la possibilité de collision. Pour cela, nous utilisons deux capteurs : la centrale inertielle pour mesurer l'angle de lacet et l'émission radio pour recevoir la mesure de la vitesse du véhicule en amont de celui équipé par le système d'alerte. Lors de l'estimation de l'angle de dérive, nous pouvons aussi obtenir l'angle de dérive désiré pour suivre la trajectoire en toute sécurité. Cet angle est calculé en fonction des grandeurs du véhicule et de sa vitesse. La comparaison entre la dérive désirée et celle estimée nous permet de détecter le début d'une situation critique. Dans ce cas, le calcul de la possibilité de collision sera fortement important. En effet, la possibilité calculée suivant les trois cas présentés précédemment sera introduite comme facteur d'ajustement de la vitesse.

Afin de percevoir le fonctionnement du nouveau système, nous allons simuler un scénario sur la sortie de route du véhicule sans excès de vitesse. Par exemple, nous pouvons considérer le cas d'une conduite normale sans aucune sollicitation, suivie d'une situation critique de sortie de route (Fig. 7.6).

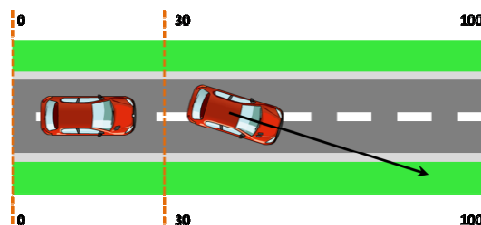


Fig. 7.6 : Scénario de sortie de route

Les résultats de l'estimation sont présentés par la (Fig. 7.7). Suivant ce scénario, nous n'avons aucune sollicitation de la vitesse et donc nous obtenons une vitesse limite égale à celle de la vitesse légale. Cependant, un événement extérieur a entraîné une situation critique de sortie de route. La possibilité de collision passe alors de 0 à 0.7. Cela se traduit ainsi par une modification au niveau de la vitesse limite qui va diminuer en fonction de la probabilité. Ainsi, une alerte sera lancée au

conducteur lorsque la vitesse de son véhicule devient supérieure à la nouvelle vitesse limite qui correspond à la possibilité de collision.

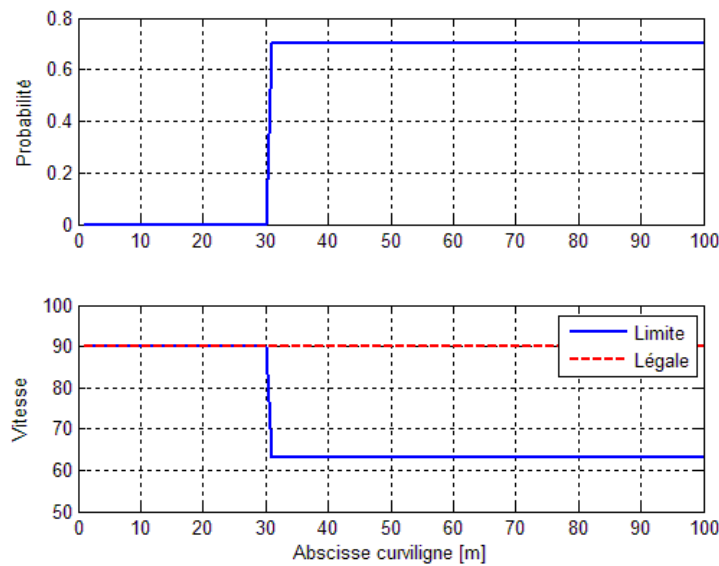


Fig. 7.7 : Variation de la vitesse avec la possibilité de collision

Nous remarquons sur la (Fig. 7.7) que le conducteur avait une vitesse inférieure à la vitesse limite qui est calculée en fonction des conditions extérieures de la conduite. Cependant, lorsque la possibilité de choc augmente, la nouvelle limite correspondante entraîne une nécessité de diminuer la vitesse et donc une alerte est lancée.

4. Validation expérimentale

Le développement d'un système d'assistance à la conduite se fera en plusieurs étapes :

- L'encadrement de l'idée principale du système et la définition du fonctionnement et le cahier des charges désirés
- Le développement théorique du système
- Le test de quelques scénarios principaux
- La conception d'un Interface Homme-Machine
- La validation expérimentale sur un véhicule d'essai
- L'étude de l'acceptabilité du système par le conducteur humain

L'objectif de notre travail était de développer un système d'alerte à des vitesses excessives afin d'éviter les sorties de route causées par les vitesses inadaptées à la situation du conduite. Les trois premières étapes du développement du système d'alerte ont été achevées précédemment tout au long des chapitres du rapport. Cependant, il reste à valider le système expérimentalement et à étudier l'acceptabilité du système par le conducteur. Ce paragraphe consiste alors à présenter la validation expérimentale : la piste d'expérimentation, le véhicule de test, l'interface Homme-Machine et les résultats des expérimentations.

4.1. Piste d'expérimentation

Notre travail se déroule au LIVIC, sur le site de Satory à Versailles. Ce site comprend une piste d'expérimentation dédiée à la recherche et au développement des automobiles. Nous avons donc utilisé cette piste pour faire les expérimentations nécessaires de notre système d'alerte.

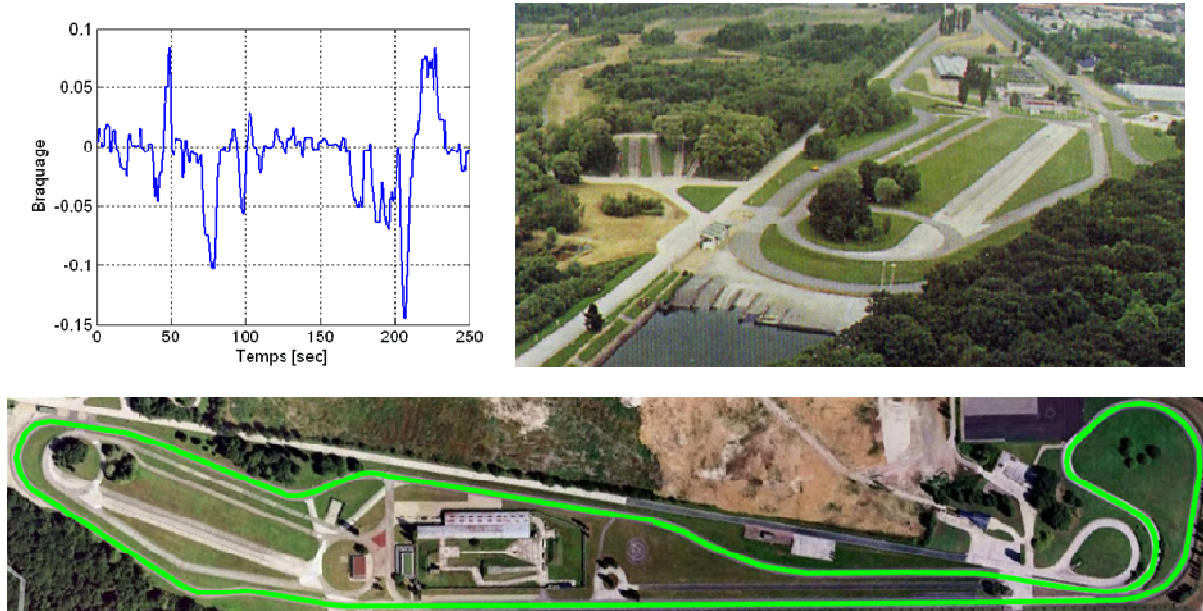


Fig. 7.8 : Zone d'expérimentation

La piste de Satory présente les différentes caractéristiques géométriques possibles de l'infrastructure de routes en France. La (Fig. 7.8) représente la trajectoire de la piste. Nous remarquons que cette trajectoire comprend des trajets rectilignes, des virages forts et faibles, des chicanes, ainsi que différents dévers, pentes et dimensions géométriques.

4.2. Véhicule d'expérimentation

Le LIVIC dispose de moyens expérimentaux importants qui nous permettent d'implanter le système développé afin de le valider expérimentalement. La (Fig. 7.9) représente la piste de Satory et le véhicule de test utilisé pour la validation. Ce véhicule est équipé de plusieurs capteurs tels que le GPS, le Codeur optique, la Centrale inertielle, le Correvit, le capteur de vitesse inductif qui se trouve dans le système ABS, ainsi qu'une Interface Homme-Machine permettant de visualiser les messages d'alertes et les informations nécessaires à présenter au conducteur.

Le fonctionnement des différents capteurs utilisés sur le véhicule d'essai a été présenté dans le chapitre (3).

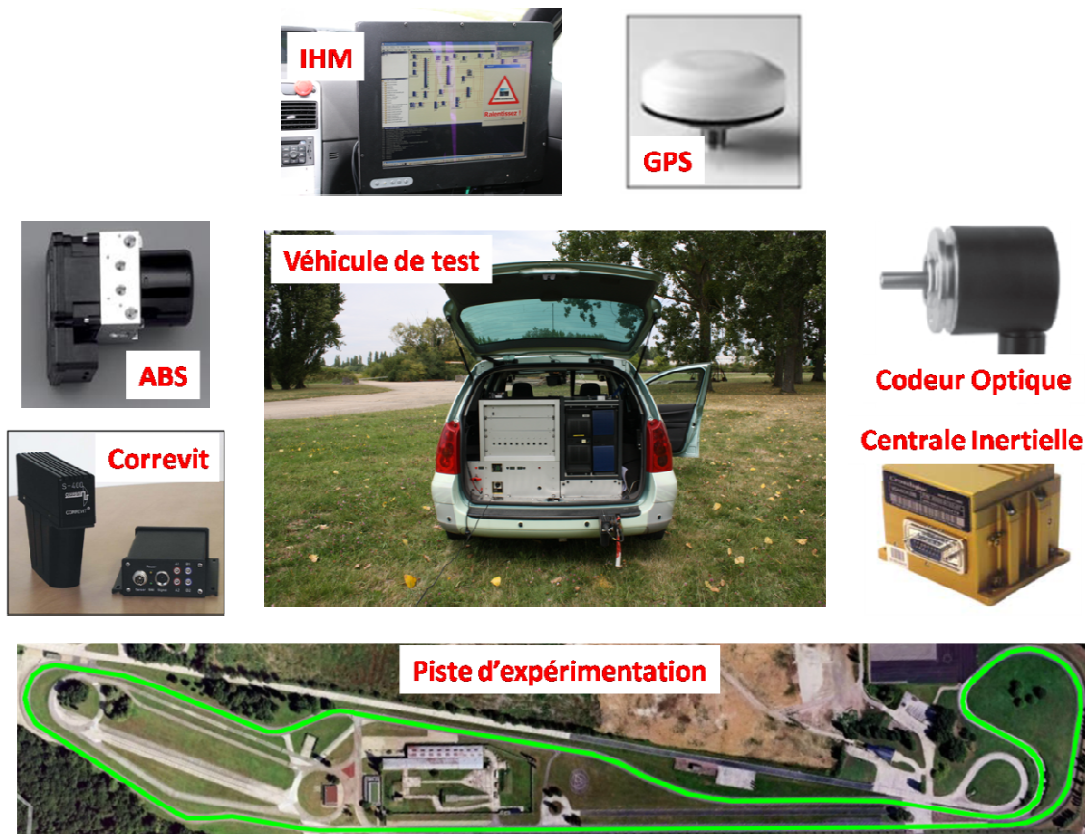


Fig. 7.9 : Véhicule et équipements d'expérimentation

4.3. Interface Homme-Machine

La détection des situations critiques n'est pas suffisante en elle-même, le plus important est d'informer le conducteur de ces situations et de le pousser à agir pour éviter les risques possibles.



Fig. 7.10 : Interface-Homme-Machine

En effet, l'information du conducteur se fait par la création d'un Interface Homme-Machine qui servira à afficher des messages visuels et même à lancer des alertes sonores au conducteur lors d'une situation à risque. Afin de compléter le développement de notre système d'alerte, nous avons conçu une Interface Homme-Machine simple mais suffisante pour envoyer le message désiré au conducteur. La (Fig. 7.10) représente l'interface affichée au conducteur lorsqu'une alerte lui est adressée pour l'informer qu'il roule à une vitesse supérieure à celle qui convient à la situation de conduite.

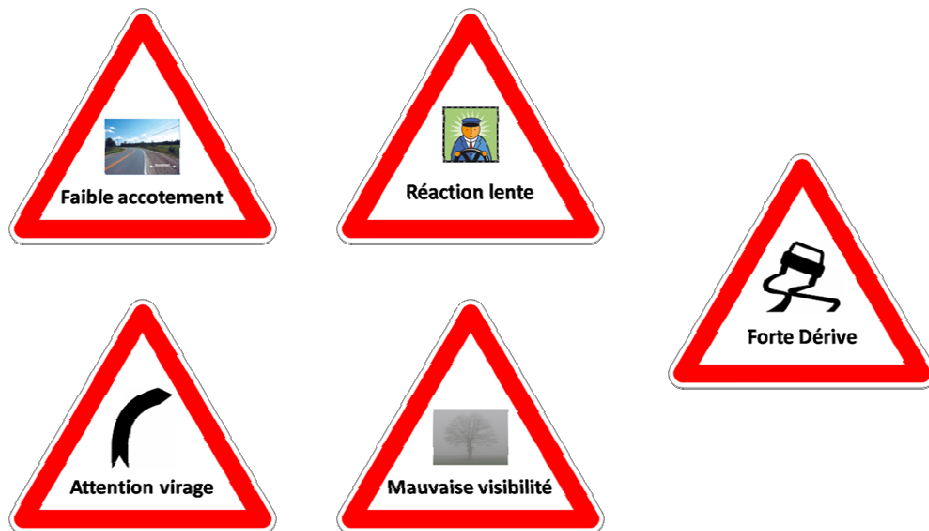


Fig. 7.11 : Panneau d’affichage de l’IHM

Cette interface est composée d’une figure et d’un message de ralentissement. La figure affiche la situation critique qui engendre la nécessité de diminuer la vitesse du véhicule (Fig. 7.11). Par exemple, lors d’une forte dérive du conducteur, la figure présente un schéma de dérive du véhicule avec le texte « Forte dérive ». En bas de la figure nous affichons le message : Ralentissez. Le choix des figures proche des panneaux utilisés sur les routes est pédagogique, pour fournir au conducteur une image semblable à celles rencontrés durant sa formation de conduite et sur les routes.

4.4. Résultats de l’expérimentation

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats des expérimentations faites sur un véhicule équipé du LIVIC afin de valider le fonctionnement du système d’alerte en temps réel. Nous proposons, dans ce but, de tester 6 scénarios :

- Une conduite normale avec une vitesse en-dessous de la limite et sans sollicitation des paramètres
- Une conduite avec un excès de vitesse
- Une conduite à faible vitesse mais avec des fortes dérives en ligne droite
- Une limitation de vitesse en virage
- Une limitation de vitesse en faible accotement
- Une limitation de vitesse en faible visibilité

Scenario 1 : pas de sollicitation

Ce scénario consiste à vérifier si le système génère des fausses alertes lors d’une bonne conduite du véhicule avec une vitesse sous la limitation. Nous remarquons sur la (Fig. 7.12) que la vitesse du véhicule est toujours en-dessous de la vitesse limite calculée par le système développé. Ainsi, le signal d’alerte n’affiche aucune situation critique, il est donc toujours nul.

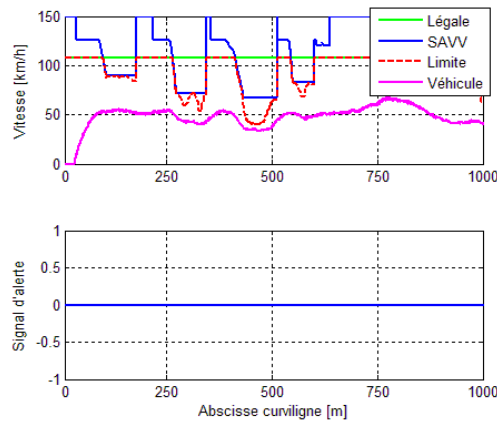


Fig. 7.12 : Vitesse et signal d'alerte

Scenario 2 : sollicitation de la vitesse - excès de vitesse

La (Fig. 7.13) montre les différentes vitesses mesurées sur le véhicule ainsi que le signal d'alerte. En effet, pour solliciter le système à des vitesses excessives sans aucune situation supplémentaire critique, nous avons effectué l'essai sur une trajectoire rectiligne en roulant à une vitesse qui atteint 130 km/h. Cependant, la vitesse réglementaire était de 110 km/h et la vitesse SAVV était fixée au maximum égale à 15 km/h puisque nous n'avons pas de virage. Sous ces conditions, la vitesse limite est égale à la vitesse réglementaire.

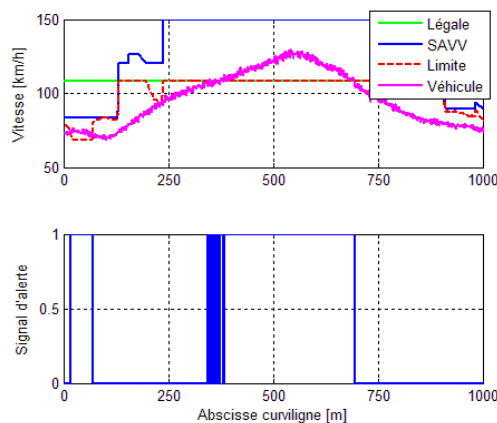


Fig. 7.13 : Vitesse et signal d'alerte

Le signal d'alerte nous montre que, sur la ligne droite, lorsque la vitesse est inférieure à 110 km/h, nous n'avons pas d'alerte. Par contre, quand la vitesse dépasse les 110 km/h, une alerte est adressée avec l'affichage des messages informant le conducteur qu'il roule à une vitesse très élevée.

Scenario 3 : sollicitation de l'angle de dérive à faible vitesse

L'objectif principal du système est d'adapter la vitesse du véhicule aux différentes conditions de la conduite. Nous nous intéressons alors aux caractéristiques de l'infrastructure, l'environnement et la dynamique du véhicule. La stabilité du véhicule peut être déterminée par l'angle de dérive. Ainsi, nous allons effectuer des fortes dérives à faible vitesse sur une trajectoire rectiligne. La vitesse n'étant pas supérieure à la limite, mais la condition de l'angle de dérive était fortement critique et entraîne alors un facteur d'ajustement très faible, ce qui signifie qu'une alerte doit être lancée.

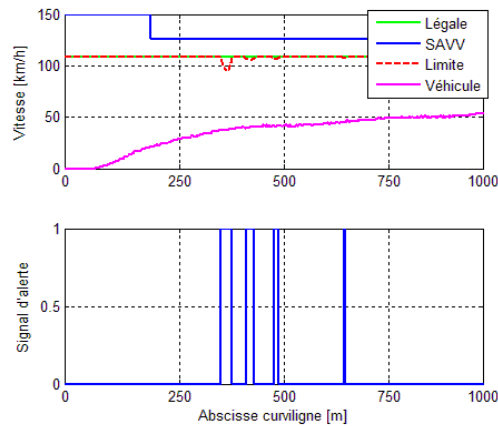


Fig. 7.14 : Vitesse et signal d'alerte

Nous remarquons sur la (Fig. 7.14) que la vitesse limite était égale à la vitesse réglementaire. Lors de fortes dérives, la vitesse est toujours en-dessous de la limite, mais suivant le signal d'alerte nous remarquons qu'il y a une alerte générée qui correspond à la mauvaise stabilité du véhicule.

Scenario 4 : sollicitation de l'infrastructure (virage)

Nous souhaitons tester le fonctionnement du système d'alerte en virage. Nous choisissons donc une trajectoire comprenant des virages avec des courbures variables. Sur la (Fig. 7.15) nous présentons les vitesses enregistrées sur le véhicule et le signal d'alerte qui affiche des valeurs égales à 1 sur les virages envisagés.

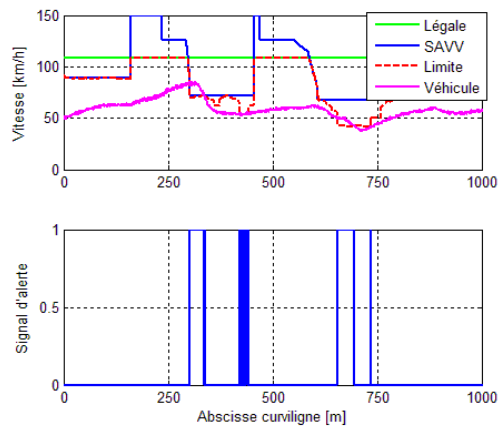


Fig. 7.15 : Vitesse et signal d'alerte

Scenario 5 : sollicitation de l'infrastructure (accotement)

L'un des paramètres les plus importants de la conduite est la largeur de l'accotement sur la route. Nous limitons ainsi la vitesse en fonction de ce paramètre. La (Fig. 7.16) représente la variation de la vitesse limite lors de la variation de la largeur de l'accotement. En fait, nous testons le système sur une route droite avec des différentes largeurs d'accotement passant de 2 m jusqu'à 0.5 m puis revenant à 5 m.

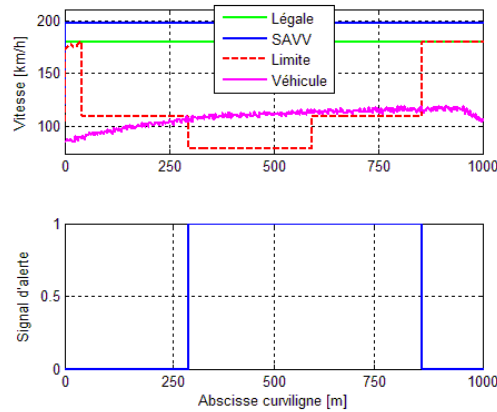


Fig. 7.16 : Vitesse et signal d'alerte

Nous remarquons sur la figure que la vitesse limite est égale à la vitesse réglementaire pour un accotement égal à 2 m. Cependant, lorsque la largeur passe à 1.5 m, le coefficient d'ajustement correspondant augmente ce qui entraîne une diminution de la vitesse. Cette diminution est amplifiée lorsque la largeur atteint 0.5 m. Selon la vitesse du véhicule, une alerte est lancée pour baisser la vitesse en-dessous de la limite.

Scenario 6 : sollicitation de l'environnement (mauvaise visibilité)

Les conditions de l'environnement influent fortement sur la limitation de la vitesse. En effet, la vitesse limite n'est jamais identique pendant un temps ensoleillé ou pluvieux. Nous nous sommes limités dans cette étude à étudier l'influence de la visibilité sur la limitation de la vitesse.

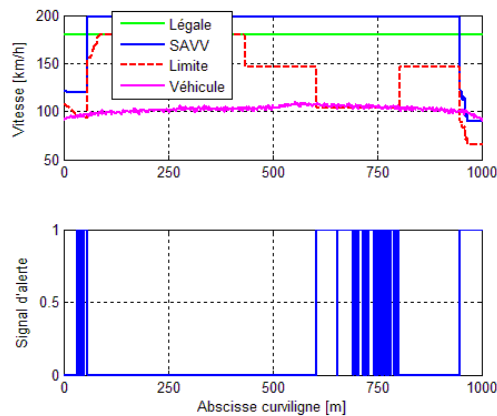


Fig. 7.17 : Vitesse et signal d'alerte

Sur la (Fig. 7.17) nous présentons la vitesse légale, SAVV, limite et celle du véhicule ainsi que le signal d'alerte. Tout au long d'un trajet rectiligne nous avons fait varier la distance de visibilité de 500 m à 50 m en passant par 250 m. Nous remarquons alors d'après le signal que des alertes ont été générées pour pousser le conducteur à diminuer la vitesse de son véhicule.

5. Etude de l'acceptabilité

L'étude de l'acceptabilité de l'assistance est un travail long que je n'ai pas pu effectuer dans le cadre de ma thèse. Néanmoins, au travers des projets auxquels le LIVIC a pris part, on peut définir quelques règles permettant d'améliorer l'acceptabilité de ce type de système.

Le développement d'un système d'assistance à la conduite est fortement avantageux à la sécurité routière du fait qu'il vise à détecter les situations critiques et à aider le conducteur à éviter les accidents routiers. Cependant, l'intégration d'un système d'alerte dans les véhicules commerciaux nécessite une étude préliminaire sur l'acceptabilité du système par les conducteurs.

En fait, pour assurer l'acceptabilité d'un système d'alerte, il faut fournir au conducteur une information à la fois simple, claire et ne perturbant pas l'attention de l'automobiliste. Pour ce faire, les consignes et les messages d'alerte sont diffusés visuellement sur le tableau de bord traditionnel ainsi que vocalement, par messages audio en connexion avec le système radio du véhicule. Des vibrations sous la pédale peuvent aussi intervenir pour signaler au conducteur son dépassement de la vitesse limite.

Par ailleurs, il a été décidé de ne pas rendre ce système intrusif, c'est-à-dire qu'il n'effectue aucune action automatiquement, laissant ainsi le conducteur maître de son véhicule à tout instant. Ce système se veut donc particulièrement pédagogique, le conducteur apprenant, par ces recommandations et alertes, à mieux adapter sa conduite aux situations rencontrées.

Il sera aussi plus efficace de faire des expérimentations avec un échantillon de conducteurs afin de déterminer un pourcentage d'acceptabilité et une évaluation pratique du système.

6. Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre le risque de collision lors d'une sortie de route non évitée par le conducteur suite à une inattention au système d'alerte. Les deux principaux scénarios considérés pour la détermination du risque de collision sont la sortie vers une autre voie de la route et la sortie vers l'extérieur de la chaussée. En étudiant ces différents cas, nous avons pu déterminer la probabilité de collision. Cette probabilité a été ensuite introduite dans le système d'alerte comme étant un nouveau facteur d'ajustement de la vitesse de référence.

Le développement théorique du système d'alerte ne suffit pas pour rassurer du bon fonctionnement en temps réel sur les véhicules. Pour cela, nous avons présenté dans ce chapitre une implantation du système sur un véhicule prototype du LIVIC et les résultats obtenus lors des expérimentations montrent que le système est intéressant et important pour éviter les sorties de route.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de la thèse était d'étudier le risque intégré de sortie de route et la proposition d'une assistance à la conduite. Dans ce rapport, nous avons pu présenter une étude sur le thème principal de la thèse et nous avons ensuite abouti au développement d'un nouveau système d'alerte nécessaire pour l'empêchement des vitesses excessives. Le rapport a été divisé en trois parties principales. La première a consisté à présenter une étude d'accidentologie et à encadrer le sujet de la thèse pour orienter notre travail. La deuxième était une partie préliminaire nécessaire pour préparer les outils de développement du système d'alerte. Enfin, la troisième partie a été le développement du système et l'implantation sous SimuLink/MatLab pour tester quelques scénarios principaux.

Nous avons présenté dans la première partie du rapport les problèmes de la sécurité routière, les statistiques sur les accidents en France, et les solutions présentées par l'état, les constructeurs d'automobile ainsi que les associations sociales. L'influence la plus efficace était donc celle des constructeurs d'automobile qui ont pu développer des systèmes d'assistance à la conduite pour éviter les situations critiques. Concernant la sortie de route, nous avons présenté plusieurs systèmes d'évitement de sortie de route. Cependant, ces systèmes n'englobent pas toutes les caractéristiques de la conduite qui peuvent influencer sur la stabilité du véhicule et donc créer des situations de sortie de route. Nous avons donc présenté le besoin d'un système modulaire pouvant considérer le plus possible des caractéristiques importantes.

Dans la première partie, nous avons aussi détaillé la relation entre la sortie de route et la vitesse du véhicule. Les statiques ont montré ce lien, ainsi que la dynamique du véhicule montre que la stabilité du véhicule est fortement liée à sa vitesse et que dans des intervalles de vitesses élevées, l'accélération latérale du véhicule peut être fortement supérieure de façon ne permettant plus aux systèmes d'assistance à la conduite de maintenir la stabilité du véhicule. De là découle que l'empêchement de la sortie de route est liée au maintien d'une vitesse inférieure à une valeur limite selon les différentes caractéristiques de la conduite.

La première partie a donc défini notre objectif de développer un système d'alerte à des vitesses excessives en fonction des paramètres de l'infrastructure, l'environnement, le conducteur et la dynamique du véhicule.

Le développement d'un tel système nécessite des connaissances sur l'état de la conduite en temps réel. Ces informations sont obtenues par l'intermédiaire des capteurs implantés sur le véhicule. Certains paramètres ne peuvent pas être mesurés ou sont mesurables par des capteurs très onéreux. Nous devons alors développer des capteurs virtuels pour déterminer les valeurs nécessaires. Ce type de capteur est appelé observateur.

La deuxième partie a été donc la partie préparatoire du développement du système d'alerte. Dans cette partie nous avons présenté le développement d'un modèle de véhicule à quatre roues. Ce modèle est indispensable pour comprendre la dynamique du véhicule et pour faire les estimations nécessaires.

L'un des paramètres nécessaires pour la compréhension de la stabilité du véhicule est l'angle de dérive. Cependant, ce paramètre ne peut pas être mesuré, nous avons donc développé un observateur basé sur la méthode du filtre de Kalman Etendu pour le déterminer.

Parmi les paramètres de l'environnement, nous avons constaté que les efforts du vent peuvent être déterminés selon deux approches : la première consiste à les estimer et à les introduire tout de suite dans la dynamique du véhicule et nous estimons ensuite l'angle de dérive qui subit ces efforts. Tandis que la deuxième nécessite la mesure de ces efforts par des capteurs nécessaires et ensuite de les intégrer dans le système d'alerte. Dans la deuxième partie du rapport nous avons présenté la méthode d'estimation des efforts du vent.

Le conducteur a été étudié par deux paramètres principaux : le temps de réponse et les accélérations longitudinale et latérale pratiquées lors de sa conduite. Le premier facteur a été introduit directement dans le système d'alerte. Par contre, les accélérations ont été identifiées par des expérimentations dans le cadre du projet ARCOS. Cette identification nous a permis de déterminer la valeur de l'adhérence mobilisée par le conducteur sur la route.

Après avoir développé les méthodes nécessaires pour la détermination des différents paramètres, nous avons présenté dans la troisième partie le développement théorique du système d'alerte. L'idée générale du système consiste à choisir une vitesse limite calculée de façon adaptative, c'est la vitesse calculée par la méthode de la SAVV qui est ensuite ajustée par des facteurs qui correspondent aux différentes caractéristiques étudiées. La vitesse ajustée a été par la suite comparée aux limitations nationales pour prendre la valeur minimale. Finalement, cette vitesse limite est comparée à la vitesse réelle du véhicule et dans le cas d'une vitesse supérieure à la limite une alerte sera déclenchée.

Nous avons limité notre étude sur certains facteurs de l'infrastructure, l'environnement, le conducteur et le véhicule. Ainsi, pour l'infrastructure nous avons considéré la courbure et l'accotement. Pour l'environnement nous nous sommes limités à la visibilité atmosphérique. Le conducteur a été présenté par le temps de réponse et l'adhérence mobilisée. Enfin, le véhicule a été caractérisé par son angle de dérive. Le choix de ces paramètres a été défini par une étude de sensibilité de la vitesse en fonction de toutes les caractéristiques de la conduite.

Le système développé a été implanté sous SimuLink/MatLab pour tester quelques scenarios importants tels que la conduite par temps pluvieux (faible adhérence), en présence de brouillard (faible visibilité), sous l'effet d'un vent latéral important, à vitesse excessive sur un virage, etc. Ces tests nous ont permis de vérifier le fonctionnement du système. Cependant, l'aspect le plus important était d'implanter en temps réel ce système et de le tester sur les véhicules expérimentaux du LIVIC. Pour cela, l'implantation a été faite sur un véhicule expérimental et les résultats des expérimentations ont été présentés dans le dernier chapitre. Ces résultats ont démontré le bon fonctionnement du système en temps réel.

Nous avons aussi abordé le cas où le conducteur ne réagit pas avec l'alerte, il effectue donc une sortie de voie. La sortie de voie vers l'accotement peut impliquer une collision avec les obstacles latéraux, mais une sortie vers une autre voie implique une possibilité d'accident avec les autres

véhicules sur la voie. Pour aborder cette situation, nous avons présenté une étude de la probabilité de collision lors de l'insertion du véhicule dans la voie adjacente.

Enfin, la thèse représente une partie de recherche dans le domaine de la sécurité routière au niveau de la détermination de la vitesse limite afin d'éviter les sorties de route. Cette étude a élaboré une nouvelle approche de calcul de la vitesse limite, ainsi une nouvelle génération des systèmes d'alertes basées sur la détermination de la vitesse en fonction de tous les paramètres influents. Cependant, dans notre étude, nous n'avons pas pu aborder tous les paramètres, il est donc important de continuer notre recherche afin de développer un système plus globale et général.

D'autres problèmes, relatifs à des types précis de véhicules, peuvent être intégrés dans la définition d'une vitesse limite. Pour les poids lourds, la hauteur du centre de gravité et le transfert de masse peuvent être aussi à l'origine de situations critiques sur la route lors de la conduite à des vitesses excessives : cela peut entraîner des renversements ou des mises en porte feuille. Le système développé dans notre étude est un système modulaire, nous pouvons donc utiliser cette architecture pour les poids lourds et limiter la vitesse en fonction des situations de renversement ou de mise en porte feuille.

Références bibliographiques

- [1] (2007) Groeneveld Home. [Online].
<http://www.groeneveld.nl/index.php?id=267>
- [2] R. G. Herrtwich, "Digital roadmaps reveal the telematic horizon", *ITS America News*, vol. 12, 2002.
- [3] I. Paromtchik and C. Laugier, "The Advanced Safety Vehicle Program", Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), 2000.
- [4] A. Dugarry, "Advanced driver assistance systems, information management and presentation", Cranfield University Thesis, 2004.
- [5] "Les accidents corporels de la circulation routiere", Observatoire National Interministeriel de Securite Routiere (ONISR) Bilan de l'insécurité routière 106, 2009.
- [6] "Les grandes données de l'accidentologie", Observatoire National Interministeriel de Securite Routiere (ONISR) Bilan de l'insécurité routière, 2007.
- [7] "Les grandes données de l'accidentologie", Observatoire National Interministeriel de Securite Routiere (ONISR) Bilan de l'insécurité routière, 2007.
- [8] "La Prevention Routiere", Infographie, 2001.

-
- [9] J. D. Finch, P. Kompfiner, C. R. Lockwood, and G. Maycock, "Speed, speed limits and crashes", Transport Research Laboratory (TRL) Project Record S211 G/RB/Project PR 58, 1994.
- [10] G. Nilsson, "Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety", Lund Institute of Technology Bulletin 221, 2004.
- [11] OCDE, *La gestion de la vitesse*, OCDE, Ed. Paris, France: Conférence Européenne des Ministres des Transports, 2007.
- [12] H. Desfontaines, "Rapport de synthèse sur l'accidentologie poids lourds", RENAULT TRUCKS 11 1-1, 2003.
- [13] B. Roussel, "Elaboration d'alertes pour les poids lourds en situations accidentogènes", Université Technologique de Belfort Rapport ARCOS 11 2-3, 2002.
- [14] J. K. Dakhallallah, H. Imine, Y. Sellami, and D. Bellot, "Heavy Vehicle State Estimation and Rollover Risk Evaluation Using Kalman Filter and Sliding Mode Observer", in *European Control Conference*, Kos, 2007.
- [15] "European Road Safety Observatory Speeding", SafetyNet Project, Final Report, 2007.
- [16] D. Pomerleau, et al., "Run-off-road collision avoidance using ivhs countermeasures", National Highway Safety Administration (NHTSA), Technical Report DOT HS 809 170, 1999.
- [17] TranSafety, "Canadian Researchers Test Driver Response to Horizontal Curves", *Road Management Engineering Journal*, Sep. 1998.
- [18] S. Glaser, "Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoires limites, Application au développement de systèmes d'aide à la conduite", LIVIC These, 2004.
- [19] S. Mammar, S. Glaser, and M. Netto, "Time to lane crossing and vehicle dynamics for lane departure avoidance", in *IEEE Transaction on*

Intelligent Transportation Systems, 2005.

- [20] J. Sainte-Marie, S. Mammar, L. Nouveliere, and V. Rouault, "Sub-optimal longitudinal control of road vehicles with capacity and safety considerations", *Journal of dynamic systems, measurement and control*, vol. 126, pp. 26-35, 2003.
- [21] R. Labayrade and D. Aubert, "Robust and fast stereovision based obstacles detection for driving safety assistance", *IEICE Japanese journal*, vol. E87-D, 2004.
- [22] V. Entenmann, "Overall technical and economical assessment", NextMAP Consortium Deliverable D5.2, 2001.
- [23] J. Huang, "Selectable lane-departure warning system and method", USA US Patent 7561032, 2009.
- [24] Y. Sugimoto and C. Sauer, "Effectiveness estimation method for advanced driver assistance system and its application to collision mitigation brake system", *Dynamic Research Inc.*, Japan, 2004.
- [25] L. Nouveliere and S. Mammar, "Experimental longitudinal control of vehicle using a second order sliding mode technique", *American Control Conference (ACC)*, vol. 6, 2003, pp. 4705-4710.
- [26] S. Wang, "Vehicle speeding alert system for GPS enabled wireless devices", USA Patent 0115113, May 2007.
- [27] R. Bosch, *Memento de technologie automobile*, 3rd ed. Bosch, 2004.
- [28] S. B. Cooper and H. Durrant-Whyte, "A kalman filter model for GPS navigation of land vehicles", *IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, Munich, Germany, 1994, pp. 157-163.
- [29] S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even, and P. Willis, *GPS localisation et navigation*. Hermes Science, 1997.
- [30] S. Sukkarieh, "Low cost, high integrity, aided inertial navigation

systems for autonomous land vehicles", These de l'Universite de Sydney, Australian Center for Field Robotics, 2000.

- [31] E. S. Agency. (2009) ESA. [Online].
<http://www.esa.int/esaNA/egnos.html>
- [32] M. Correvon, *Systèmes électromécaniques*. Suisse.
- [33] P. Borne, G. Dauhin-Tanguy, J. P. Richard, F. Rotella, and I. Zambettakis, *Commande et Optimisation des Processus*. Paris, France: Technip, 1990, vol. 1.
- [34] R. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", *Transaction of the ASME - Journal of Basic Engineering*, 1961, pp. 93-108.
- [35] J. Ackermann and D. Odenthal, "Damping of vehicle roll dynamics by gain scheduled active steering", *European Control Conference (ECC)*, Karlsruhe, 1999.
- [36] A. Liu and A. Pentland, "Towards real-time recognition of driver intentions," in *Intelligent Transportation System*, Boston, USA, 1997, pp. 236-241.
- [37] A. Gelb, *Applied optimal estimation*. Cambridge: The MIT Press, 1974.
- [38] B. D. Anderson and J. B. Moore, *Optimal filtering*. Englewood Cliffs, 1979.
- [39] F. Rotella, "Filtrage optimal", Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tarbes Cours de l'Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tarbes, 2003.
- [40] P. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, and A. S. Morse, "Adaptive output-feedback control of a class of nonlinear systems", *Internation Journal of Systems Science*, pp. 1666-1682, 1991.
- [41] K. J. Astrom, *Introduction to stochastic control theory*. NewYork,

1970.

- [42] D. Luenberger, "Observing the state of a linear system", *IEEE Transaction on Military Electronics*, 1964, pp. 74-80.
- [43] C. S. Hsieh and F. C. Chen, "Modified stochastic luenberger observers", *Automatica*, vol. 36, 2000, pp. 1847-1854.
- [44] F. L. Lewis, "A survey of linear singular systems", *Circuits Systems Signal Process*, Georgia, USA, 1986, pp. 3-36.
- [45] J. Chen and H. Zhang, "Robust detection of faulty actuators via unknown input observers", *Internation Journal of Systems Science*, pp. 1829-1839, 1991.
- [46] D. Soffker, "Fault detection using proportional integral observers for application to elastic mechanical structures", *Multiconference CESA IMACS*, Lille, 1996, pp. 522-527.
- [47] S. Mammar, S. Glaser, and M. Netto, "Unkown input proportional-integrated observers for lateral vehicle dynamics estimation", *European Control Conference*, Athen, 2006.
- [48] Drakunov, "Sliding mode observers based on equivalent control method", *IEEE Decision and Control*, vol. 2, Tucson, USA, 1992, pp. 2368-2369.
- [49] Drakunov and Ozguner, "Decentralized sliding observers for interconnected nonlinear systems", *IEEE on Decision and Control*, 1992.
- [50] G. Stephanopoulos and K. Y. San, "Studies on online bioreactor identification", *iotechnology and bioengineering*, vol. 26, pp. 1176-1188, 1984.
- [51] A. Tadayyon and S. Rohani, "Extended kalman filter - based nonlinear model preductive control of a continuous crystalliser", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 79, 2001.

-
- [52] R. L. Ray, "Nonlinear state and tire force estimation for advanced vehicle control", *IEEE Transaction Control Systems Technology*, vol. 3, 1995, pp. 117-124.
- [53] R. L. Ray, "Nonlinear tire force estimation and road friction identification", *Automatica*, vol. 33, 1997, pp. 1819-1833.
- [54] A. Suissa, Z. Zomotor, and F. Bottiger, "Method for determining variables characterizing vehicle handling", Stuttgart, Germany Patent 5557520, 1996.
- [55] J. Slotine, J. K. Hedrick, and E. A. Misawa, "On sliding observers for nonlinear systems", *Journal Dynamic, Systems, Measurement and Control*, vol. 109, 1987.
- [56] G. Wang, S. Peng, and H. Huang, "A sliding observer for nonlinear process control", *Chemical Engineering Science*, vol. 25, 1997, pp. 787-805.
- [57] J. Stephant, A. Charara, and D. Meizel, "Evaluation of a sliding mode observer for vehicle sideslip angle", *Control Engineering Practice*, vol. 15, pp. 803-812, 2006.
- [58] V. Krishnaswani and G. Rizzoni, "Vehicle steering system state estimation using sliding mode observers", *IEEE Decision and Control*, vol. 4, New Orleans, USA, 1995, pp. 3391-3396.
- [59] R. Aguilera-lopez and R. Maya-Yescas, "State estimation for nonlinear systems under model uncertainties : a class of sliding mode observers", *Journal of Process Control*, vol. 15, pp. 363-370, 2005.
- [60] A. J. Krener and A. Isidori, "Linearization by output injection and nonlinear observers", *Systems Control Lett*, vol. 3, 1983, pp. 47-52.
- [61] A. J. Krener and W. Respondek, "Nonlinear observer with linearizable error dynamics", *SIAM J. Control Optim.*, vol. 23, 1985, pp. 197-216.
- [62] V. Lopez, F. Plestan, and A. Glumineau, "Linearization by completely generalized input output injection", *KYBERNETIKA*, vol. 35, 1999, pp. 793-

802.

- [63] N. Kazantzis and C. Kravaris, "Nonlinear observer design using Lyapunov's Auxiliary Theorem", *IEEE Decision and Control*, vol. 5, San Diego, USA, 1997, pp. 4802-4807.
- [64] S. Nicosia and A. Tornambe, "High-gain observers in the state and parameter estimation of robotics having elastic joints", *Systems & Control letters*, vol. 13, pp. 331-337, 1989.
- [65] F. Esfandiari and H. K. Khalil, "Observer based control of fully linearizable nonlinear systems", *IEEE Decision and Control*, vol. 1, Tampa, USA, 1989, pp. 84-89.
- [66] G. Bornard, "A high gain observer for a class of uniformly observable systems", *Decision and Control Conference*, vol. 2, Brighton, UK, 1991, pp. 1494-1496.
- [67] M. Fliess and J. Rudolph, "Corps de Hardy et observateur asymptotiques locaux pour systemes différentiellement plats", *Comptes rends de l'Académie des sciences, Série II, Mécanique, physique, chimie, astronomie*, vol. 324, pp. 513-519, 1997.
- [68] J. Picard, "Efficiency of the extended kalman filter for nonlinear systems with small noise", *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 51, pp. 843-885, 1991.
- [69] P. Milherio and D. Oliveira, "Approximate filters for a nonlinear discrete time filtering problem with small observation noise", *Stochastics and stochastics report*, vol. 46, pp. 1-24, 1994.
- [70] S. Julier and J. Uhlmann, "A new extension of the kalman filter to nonlinear systems", *International Symposium Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls*, 1997, pp. 182-193.
- [71] E. A. Wan and R. Merwe, "The unscented kalman filter for nonlinear estimation", *IEEE Symposium on Adaptive Systems for Signal Processing, Communication and Control*, 2000, pp. 153-158.

-
- [72] X. Rong Li and V. P. Jilkov, "A survey of manoeuvring target tracking", *SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Target*, 2001, pp. 4473-4571.
- [73] M. Aoki and J. R. Huddlie, "Estimation of the state vector of a linear stochastic systems with a constrained estimator", *Automatic Control, IEEE Transactions on*, Los Angeles, USA, 1967, pp. 432-433.
- [74] H. B. Pacejka, *Tyre and Vehicle dynamics*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002.
- [75] J. Dugoff, P. Fanches, and L. Segel, "An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance", *SAE International*, 1970.
- [76] U. Kiencke and L. Nielsen, *Automotive control system*. Berlin: Springer, 2000.
- [77] B. Amar, "Modele de comportement des vehicules tout terrain pour la planification physico-geometrique des trajectoires", Université Pierre et Maris Curie Rapport de these, 1994.
- [78] E. Bakker, H. B. Pacejka, and L. Lidner, "A new tire model with an application in vehicle dynamics studies", *SAE transactions*, vol. 98, pp. 101-113, 1989.
- [79] H. Peng and J. S. Hu, "Traction/braking force distribution for optimal longitudinal", *Vehicle System Dynamics*, 1996, pp. 301-320.
- [80] J. P. Lauffenburger, "Contribution à la surveillance temps-réel du système conducteur - véhicule - environnement : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite", Université de Haute Alsace Rapport de these, 2002.
- [81] M. Gerard, "Tire-road friction estimation using slip-based observers", Lund University Thesis 0280-5316, 2006.
- [82] S. Mammar and D. Koenig, "Vehicle handling improvement by active

steering", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Tokyo, 2002.

- [83] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*. Springer, 2006.
- [84] E. C. Yeh and R. H. Wu, "Closed-loop Design for Decoupling Control of a Four-Wheel Steering Vehicle", *Internation Journal of Vehicle Design*, vol. 10, no. 6, pp. 703-727, 1989.
- [85] J. C. Gerdes and J. Ryu, "Integrating Inertial Sensors with GPS for Vehicle Dynamics Control", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2004.
- [86] A. Hac and E. Bedner, "Robustness of Side Slip Estimation and Control Algorithms for Vehicle Chassis Control", *Delphi*, SA, 2006.
- [87] T. Hiraoka, H. Kumamoto, and O. Nishihara, "Sideslip angle estimation and active front steering system based on lateral acceleration data at centers of percussion with respect to front/rear wheels", *Society of Automotive Engineers of Japan*, vol. 25, pp. 37-42, Sep. 2004.
- [88] J. Ryu, "State and parameter estimation for vehicle dynamics control using", Stanford University, Thesis report, 2004.
- [89] D. Bevly, R. Sheridan, and J. C. Gerdes, "Integrating ins sensors with gps velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness", *American Control Conference*, vol. 1, Arlington, USA, 2001, pp. 25-30.
- [90] M. Hiemer, "Model based detection and reconstruction of road traffic accidents", Universität Fridericiana Karlsruhe genehmigte Thesis, 2004.
- [91] M. Civate and M. Flavie, "La mesure de la visibilité", ENM Fiche descriptive 1, 2008.
- [92] B. C. and D. E., "Wavelet transform for analyzing fog visibility", *IEEE Intelligent Systems*, 1998, p. 13(6):66–71.
- [93] N. Hautiere, D. Aubert, and M. Jourlin, "Détection des conditions de

visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée", *MajecSTIC*, Rennes, France, 2005.

- [94] "International lighting vocabulary", 1, 1987.
- [95] C. T., "Visual perception", Academic Press, 1970.
- [96] R. Rajamani, *Vehicle Dynamic and Control*. USA: Springer, 2006.
- [97] *Memento de technologie automobile*, 3rd ed. Allemagne: Robert Bosch GmbH, 2004.
- [98] R. Merwe and E. Wan, "Sigma-point kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models", *Workshop on Advanced in Machine Learning*, 2003.
- [99] T. Lefebvre, H. Bruyninckx, and J. Schutter, "Kalman filters for nonlinear systems: a comparison of performance", *The International Journal of Control*, 2004.
- [100] "Comparaisons avec d'autres modes de transport", Observatoire National Interministeriel de Securite Routiere (ONISR) Bilan de l'insécurité routière, 2006.
- [101] "Rapport de Genève sur l'accidentologie", Organisation Mondiale de la Sante (OMS), 2004.
- [102] "Rapport du ministere du Transport, de l'Equipement, du Tourisme et de la Mer", 2006.
- [103] R. Amalberti, "Presentation au comite de pilotage Arcos", ARCOS, Paris, Technical report, 2003.
- [104] F. Bar and Y. Page, "Les sortie de voie involontaires", Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques (CEESAR - LAB) Rapport technique, 2002.

- [105] A. Fossard and J. Normand-Cirot, *Systemes non lineaire*. France: Dunod, 1993, Serie Automatique.
- [106] C. T. Leondes and M. Noval, "Reduced-order observers for liner discret-time systems", *Automatic Control, IEEE Transactions*, vol. 19, Los Angeles, USA, 1974, pp. 42-46.
- [107] R. Merwe and E. Wan, "The square-root unscented kalman filter ofr state and parameter estimation", *Internation Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Salt Lake City, Utah, 2001.
- [108] D. Vlieger, *On-board emission and fuel concumption measurement campaign on petroldriven passenger cars*. Atmospheric Environment, 1997, vol. 31.
- [109] J. Lu, J. Park, J. Pernia and S. Dissayanake, *Criteria for setting speed limits in urban and suburban areas in Florida*. Technical Report, University of south Florida, Florida, USA, March 2003.
- [110] *Une brève analyse des accidents causés par la vitesse excessive au Canada*. Fiche de renseignement, TP2436F, Direction gnérale de la sécurité routière et de la réglementation automobile, Canada, Juin 2008.
- [111] *Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes*. Rapport Technique, SETRA, France, Janvier 2006.