

Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort : un compromis entre économie et écologie

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 27 juin 2011

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université d'Évry-Val-d'Essonne
(spécialité Automatique)

par

Hong Tu LUU

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Yann CHAMAILLARD	Professeur à l'Université d'Orléans
	Philippe CHEVREL	Professeur à l'école des Mines de Nantes
<i>Examineurs :</i>	Maurice COUR	Continental Automotive
	Emmanuel GODOY	Professeur à SUPELEC
	Bernard JACOB	Ingénieur Général à l'IFSTTAR
<i>Encadrant :</i>	Lydie NOUVELIÈRE	Maitre de conférence, Université d'Évry-Val-D'Essonne
<i>Directeur :</i>	Saïd MAMMAR	Professeur à l'Université d'Évry-Val-d'Essonne

Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs
IFSTTAR 14, route de la Minière 78000 Versailles-Satory



Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au laboratoire sur les Interactions Véhicule-Infrastructure-Conducteur (unité mixte INRETS/LCPC). Je tiens à remercier sincèrement son directeur, Monsieur Jacques Ehrlich, pour son accueil et sa confiance pendant ces trois années.

Je remercie particulièrement Monsieur Saïd Mammar, Professeur de l'université d'Evry-Val-d'Essonne, et Madame Lydie Nouvelière, Maître de Conférences à l'université d'Evry-Val-d'Essonne, de m'avoir confié cette thèse.

J'exprime ma profonde gratitude envers Monsieur Saïd Mammar, mon directeur de thèse, avec qui les discussions sont toujours très enrichissantes et enthousiastes. Je le remercie encore une fois pour ses conseils scientifiques qui ont su me guider dans mes recherches.

Je suis particulièrement redevable envers Madame Lydie Nouvelière, qui a été encadrante de cette thèse pour sa confiance, ses encouragements permanents qui m'ont aidé à surmonter des moments délicats, des difficultés à la fois professionnelles et personnelles. Ses remarques pertinentes et ses précieux conseils ont largement contribué à l'aboutissement de cette thèse. Je la remercie encore une fois pour sa gentillesse.

Je remercie Messieurs Yann Chamailard et Philippe Chevrel pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et pour l'attention avec laquelle ils ont lu mon mémoire.

Je remercie également Messieurs Maurice Cour, industriel à la Continental Automotive, Emmanuel Godoy, Professeur à Supélec, Bernard Jacob, ingénieur général à l'IFSTTAR d'avoir accepté de faire partie des membres du jury.

Je souhaiterais vivement remercier l'ensemble des personnels du LIVIC pour son accueil chaleureux, pour son soutien et pour sa participation aux différents tests d'évaluation du système. J'exprime notamment ma gratitude envers :

- Benoît Lusetti pour ses conseils, ses supports précieux, pour ses heures innombrables sur les circuits de tests. Avec lui, l'implantation du système sur le véhicule devient plus simple.
- Séverine Somma pour sa gentillesse et sa disponibilité sur toutes sortes de questions.
- Guillaume Saint-Pierre pour ses discussions, ses échanges et pour son engagement afin de rendre possible l'arrivée du véhicule VANI sur le circuit ARCOS.
- Sébastien Glaser pour ses explications sur la dynamique du véhicule et plus particulièrement sur le système d'alerte en vitesse en approche de virage.
- l'ensemble du personnel du LIVIC, que je n'ai pas encore mentionné, son directeur adjoint Monsieur Didier Aubert, ses secrétaires Isnîé Rusani et Christelle Evrard, ses chercheurs, ingénieurs et ses techniciens.
- l'ensemble de mes amis doctorants, apprentis et stagiaires.

Je remercie évidemment ma femme Phuong Liên, ma fille Tu Linh et ma grande famille pour leur irremplaçable et inconditionnel soutien. Elles ont été présentes pour écarter les doutes, soigner les blessures et partager les joies. Cette thèse est aussi un peu la leur.

Je souhaite rendre hommage à mon défunt père.

"Papa,

Je ne pourrais jamais assez te remercier. J'ai voulu mener cette thèse à terme pour que tu sois fier de moi.

Tu resteras dans nos cœurs pour toujours."

*Je dédie cette thèse
À mes parents,
À ma femme et ma fille,
À ma grande famille,*

Résumé de thèse

De nos jours, la voiture s'est dotée de nombreuses fonctions d'aide à la conduite permettant au conducteur d'être plus sécuritaire tout en améliorant son confort. Dans le contexte où le secteur automobile apparaît comme l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre, des efforts doivent être apportés pour répondre à des normes antipollution de plus en plus contraignantes. Une des solutions qui permet de réagir de façon rapide et peu onéreuse consiste à réduire la consommation en carburant en agissant sur le changement du comportement du conducteur. Dans la continuité des recherches effectuées au LIVIC, l'objectif de la thèse est donc de développer un système qui aide le conducteur à adopter globalement une conduite plus économique, et qui plus est, écologique et sécuritaire.

Notre approche se différencie des études et systèmes déjà existants par la stratégie utilisée. Celle-ci prend à la fois en compte les caractéristiques du véhicule, celles de l'infrastructure et surtout la situation dans laquelle se trouve le véhicule.

Pour cela, on se place dans le contexte où la carte numérique contenant la géométrie de la route (pente, dévers, courbure) et les limitations de vitesse est disponible, la distance inter-véhiculaire est mesurable et les caractéristiques longitudinales du véhicule sont connues. Partant de ces informations, le problème d'optimisation de la consommation en carburant est formulé et ensuite résolu par une technique de programmation dynamique. La stratégie de calcul en ligne est par la suite adoptée pour rendre le système adaptatif aux conditions de trafic. C'est ainsi que, sur la base de cette stratégie, le couplage entre le problème de sécurité routière et de réduction de consommation est réalisé.

A l'aide de simulations, on a pu montrer que la prise en compte de certaines contraintes de sécurité (limitation de vitesse, vitesse en approche de virage, respect de la distance de sécurité) dans la stratégie d'économie de carburant permet non seulement d'atteindre les objectifs écologiques, mais en plus, rend les consignes du système plus fiables, cohérentes et plus sûres. Des expérimentations sur véhicule prototype sont réalisées sur les pistes d'essai à Versailles Satory ainsi que sur un itinéraire situé dans les Yvelines. Lors de cette étape, il s'agit d'évaluer le système suggestif avec une interface Homme-Machine bien spécifique. Les résultats montrent que le suivi des consignes, données par le système, est tout à fait réalisable par le conducteur. Ces essais confirment aussi le potentiel d'économie de carburant et l'amélioration de la sécurité grâce à notre système. En comparaison avec le style d'éco-conduite des conducteurs, l'économie en carburant en moyenne est de 7,5% et peut atteindre 12,9% et des réductions des dépassements de vitesse de 50% en moyenne et atteint près de 80% pour certains conducteurs. Mais, de toute évidence, le LIVIC devra réaliser des campagnes d'essais plus conséquentes pour mieux confirmer le gain potentiel du système. Avec la conception d'un système actif, ce point fait partie des perspectives de cette thèse.

Table des matières

Notations	xv
1 Acronymes	xv

Introduction

1 Contexte général	1
2 Objectifs et contribution	2
3 Organisation du mémoire	4

Chapitre 1

État de l’art

1.1 Mesures de réduction de consommation dans les transports	5
1.1.1 Généralités	5
1.1.2 Mesures politiques	11
1.1.3 Avancées technologiques	12
1.1.4 Éco-conduite	13
1.2 Systèmes d’aide à la conduite écologique	15
1.2.1 Concepts	15
1.2.2 Systèmes commercialisés	19
1.2.3 Gains en économie de carburant	24
1.3 Discussion sur la consommation des véhicules lourds	25
1.4 Conclusion	26

Chapitre 2

Modélisation du véhicule et de la consommation

2.1 Modèle longitudinal du véhicule	29
2.1.1 Forces opposées au mouvement du véhicule	30
2.1.2 Force aux roues fournie par le moteur	32
2.1.3 Équation du mouvement longitudinal	35
2.1.4 Discussion sur le modèle utilisé	36

2.2	Modèle de consommation	37
2.2.1	Généralités	37
2.2.2	Quelques modèles existants	38
2.2.3	Développement d'un modèle de consommation à partir de données expérimentales [LNM09]	43

Chapitre 3

Problème d'optimisation de consommation de carburant

3.1	Formulation du problème d'optimisation	54
3.1.1	Équation dynamique du système	54
3.1.2	Critère	55
3.1.3	Contraintes	55
3.1.4	Problème de contrôle optimal	57
3.2	Méthodes numériques d'optimisation	58
3.2.1	Revue des méthodes	58
3.2.2	Programmation Quadratique Successive (SQP)	60
3.2.3	Programmation dynamique (PD)	62
3.3	Résolution d'un problème simple	64
3.3.1	Hypothèses simplificatrices	64
3.3.2	Problème sous forme discrétisée	67
3.3.3	Application de la méthode SQP	68
3.3.4	Application de la programmation dynamique	72
3.3.5	Comparaison des deux méthodes	73
3.4	Conclusions	75

Chapitre 4

Vers un système d'aide à la conduite écologique et sécuritaire

4.1	Problème d'optimisation multi-objectifs	78
4.1.1	Nouvelle approche du problème	78
4.1.2	Recherche d'une nouvelle fonction coût	79
4.1.3	Influence de la pente	87
4.1.4	Conclusion	90
4.2	Approche pour un calcul en ligne	94
4.2.1	Analyse de la complexité de la programmation dynamique	94
4.2.2	Changement de méthode de discrétisation	95
4.2.3	Utilisation de l'horizon électronique	96
4.2.4	Réduction de l'espace de recherche	97

4.2.5	Conclusion	98
4.3	Extension au problème de sécurité	98
4.3.1	Définition du contexte de sécurité	99
4.3.2	Choix de la stratégie	102
4.3.3	Contrôleur de logique floue	103
4.4	Validation de la stratégie développée : cas d'un système actif	108
4.4.1	Conception d'un système actif	108
4.4.2	Résultats de simulation	111
4.5	Conclusion	113

Chapitre 5

Expérimentation

5.1	Interface Homme-Machine (IHM)	116
5.1.1	Analyses des informations pertinentes	116
5.1.2	Évolutions des versions de l'interface	118
5.1.3	Gestion de l'interface	121
5.1.4	Conclusion	122
5.2	Mise en place de l'expérimentation	122
5.2.1	Équipements du véhicule	122
5.2.2	Présentation des pistes	124
5.2.3	Implantation	126
5.3	Campagnes d'évaluation du système	130
5.3.1	Objectifs	130
5.3.2	Organisation	130
5.3.3	Déroulement des tests	131
5.4	Résultats et analyses	132
5.4.1	Scénario 1 : circulation libre	134
5.4.2	Scénario 2 : circulation contrainte par un véhicule précédent	140
5.4.3	Scénario 2 : discussions sur la vitesse en virage et la distance inter-véhiculaire	144
5.4.4	Conclusion	148

Conclusion

Bibliographie

Bibliographie	155
----------------------	------------

Annexes	165
----------------	------------

Annexe A	Annexe	165
A.1	Paramètres des véhicules	165
A.2	Données du projet LAVIA	166
A.3	Données du véhicule Renault Clio Eco2	167
A.3.1	Donnée du bus CAN	167
A.3.2	Consommation mesurée avec le débitmètre	168
A.4	Méthodes des moindres carrés	170
A.5	Développement de l'IHM : évolution des versions	170
A.6	Compléments théoriques sur la commande par mode glissant	173
A.6.1	Définitions	173
A.6.2	Existence d'un mode de glissement	173
A.6.3	Avantage et inconvénient des modes glissants d'ordre 1	175

Table des figures

1.1	Émissions mondiales de CO_2 en 2008 par secteurs (a) et du secteur du transport (b) (source [Age10])	6
1.2	Émissions des gaz à effet de serre dans le transport routier en France en 2006. Cette proportion reste peu changée jusqu'à aujourd'hui	6
1.3	Cycle Européen urbain et extra-urbain ECE-EUDC (source [JAV ⁺ 99])	7
1.4	Banc à rouleaux homologation avec le système de soufflerie (source UTAC)	8
1.5	Cycle américain FTP75 (urbain) et US Highway (interurbain) pour les véhicules légers (source [JAV ⁺ 99])	8
1.6	Évolution de la consommation unitaire moyenne des véhicules en France. (a) : Consommation conventionnelle (source ADEME) ; (b) : Consommation réelle (source Bilan de circulation)	9
1.7	Différentes pertes d'énergie fournie par le moteur [Pon10] d'après GM	13
1.8	Structure des systèmes d'aide à la conduite écologiques embarqués	17
1.9	Interface proposée dans [vdVDvM01]	18
1.10	Concept MDD	19
1.11	Tableau de bord proposé dans le projet GERICO	20
1.12	Interface sur véhicule Astra	20
1.13	Système Eco Assist TM présenté par HONDA	21
1.14	Système ECOREAD ECONEN II proposé par la société Finlandaise Paetronics Oy	22
1.15	Interface du logiciel EcoDrive du constructeur FIAT	23
1.16	Boitier EcoGyzer et Interface du logiciel proposé par la société Nomadic Solution	23
1.17	Version EcoGyzer pour les nomades	23
1.18	Logiciel EcoRoute compatible avec les GPS Garmin Nüvi	24
1.19	Bilan de la circulation des transports en France en 2008 [dledS]	25
2.1	Différentes forces résistantes longitudinales agissant sur le véhicule	30
2.2	Système de transmission	32
2.3	Cartographie du moteur du véhicule Renault Laguna	32
2.4	Approximation du couple moteur maximal de la Renault Laguna	33
2.5	Approximation du couple moteur maximal de la Renault Eco2	34
2.6	Implantation du modèle sous Matlab/Simulink	36
2.7	Données enregistrées	37
2.8	Comparaison de la réponse du modèle aux données réelles	37
2.9	Approche ARFCOM pour la modélisation de la consommation [Big88]	42
2.10	Estimation avec le modèle K. Post	44
2.11	Estimation avec le modèle EMIT	45
2.12	Estimation avec le modèle (2.46)	46

2.13	Modèle (2.47) avec vitesse élevée	47
2.14	Estimation avec le modèle (2.48)	47
2.15	Estimation avec le modèle (2.49)	48
2.16	Estimation avec le modèle 2.50	50
2.17	Comparaison de la réponse du modèle aux données réelles	51
2.18	Estimation sur un trajet dans les Yvelines	51
2.19	Estimation sur le trajet entre Paris et Lille	52
3.1	Courbe iso-consommation du moteur du véhicule Renault Laguna	65
3.2	Possibilité de choisir un meilleur point de fonctionnement du moteur avec le changement du rapport de boîte [Duy09]	65
3.3	Principe de sélection du rapport de boîte	66
3.4	Courbe du couple et de la puissance du moteur TCE 100 (source : Renault)	67
3.5	Profils optimaux obtenus avec l'algorithme SQP	70
3.6	Régime moteur obtenu avec l'algorithme SQP	70
3.7	Effets d'initialisation de l'algorithme SQP	71
3.8	Profils optimaux obtenus avec l'algorithme SQP - cas défavorable	71
3.9	Formalisation du problème optimal avec la théorie des graphes	72
3.10	Profils optimaux obtenus avec l'algorithme PD	73
3.11	Régime moteur obtenu avec l'algorithme PD	74
3.12	Comparaison des profils de vitesses optimaux obtenus avec l'algorithme SQP et PD	75
3.13	Comparaison des profils de couples optimaux obtenus avec les algorithmes SQP et PD	75
4.1	Profils optimaux : cas du temps minimal	80
4.2	Accélération en m/s^2 (en noir) et Jerk en m/s^3 (en bleu) du véhicule avec leurs contraintes (lignes horizontales en pointillées) : cas du temps minimal	81
4.3	Régime moteur : cas du temps minimal	81
4.4	Problème en temps minimal : comparaison des deux approches au niveau du rapport de boîte	82
4.5	Problème en temps minimal : comparaison, des régimes moteur, des deux approches du rapport de boîte	82
4.6	Profils optimaux : $Q_1=0.5$ $Q_2=1$	83
4.7	Compromis entre le temps de trajet et la consommation : comparaison des profils optimaux - (a) profils de vitesse (b) profils de couple	84
4.8	Régime moteur : $Q_1=0.5$ $Q_2=1$	84
4.9	Profils optimaux : $Q_1 = 0.5$ $Q_2 = 1$	85
4.10	Accélération (en bleu pointillé) et Jerk (en noir solide) : $Q_1=0.5$ $Q_2=1$	86
4.11	Influence du critère CONFORT sur la vitesse (a) et sur le jerk (b)	87
4.12	Influence du critère CONFORT sur un profil non oscillatoire	87
4.13	Profils optimaux sur une montée de 5% d'inclinaison : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)	88
4.14	Profil optimaux sur une descente de -5% : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)	89
4.15	Profils optimaux dans le cas d'une vallée : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)	90
4.16	Profils optimaux dans le cas d'une colline : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)	90

4.17	Profils optimaux sur un trajet de 4 km entre deux arrêts : cas en temps minimal (les rapports de boîte sont multipliés par un facteur 5 et représentés avec l'échelle à gauche)	91
4.18	Profils optimaux sur un trajet de 4 km entre deux arrêts : $Q1=0.5$ $Q2=1$ $Q3=0.2$	92
4.19	Profils optimaux de la piste d'essais : $Q1=0.5$ $Q2=1$ $Q3=0$	93
4.20	Discrétisation du problème en temps	94
4.21	Discrétisation du problème en distance	95
4.22	Stratégie d'optimisation	96
4.23	Méthode de calcul de la vitesse de consigne	97
4.24	Stratégie de réduction de l'espace de recherche. La dimension de l'espace de recherche varie en fonction de la phase où le véhicule se trouve. En phase d'accélération à partir d'une vitesse basse, la dimension de l'espace de recherche est plus grande qu'en phase de croisière	98
4.25	Problème de la distance de sécurité entre véhicules	100
4.26	Structure parallèle pour un système écologique et sécuritaire	102
4.27	Structure en cascade	103
4.28	Détermination de l'intervalle de vitesse contrainte	104
4.29	La structure du contrôleur floue	105
4.30	Fonctions d'appartenance associées à la variable Δv	105
4.31	Fonctions d'appartenance associées à la variable SM	106
4.32	Fonctions d'appartenance associées à la variable Δv_{PV}	106
4.33	Fonctions d'appartenance associées à la variable de sortie	106
4.34	Schéma complet d'un système actif	108
4.35	Résultats avec le correcteur PID	109
4.36	Commande par mode glissant pour le système actif	110
4.37	Profil optimal avec $Q1=1$, $Q2=1$, $Q3=1$	111
4.38	Marge de sécurité avec $Q1=1$, $Q2=1$, $Q3=1$	112
5.1	Cycle de développement de l'IHM	116
5.2	Informations disponibles	117
5.3	Première version de l'IHM	118
5.4	Code des couleurs utilisé pour l'IHM (la différence de vitesse est en km/h)	119
5.5	Version évoluée de l'IHM	119
5.6	Version finale de l'IHM	120
5.7	Exemples de fonctionnement de l'IHM	121
5.8	Exemple de message lors de la désactivation de l'IHM	122
5.9	Équipements des véhicules d'essais	123
5.10	Imprécision des mesures du radar laser dans certaines situations. (a) : Problème lié au virage (b) : Problème lié à la pente	124
5.11	Vue d'ensemble des pistes à Satory	125
5.12	Circuit Routière-Val d'Or	126
5.13	Circuit ARCOS	127
5.14	Étapes de traitement du système EDAS	128
5.15	Implantation du système sous RTMaps, sur le véhicule suiveur : interface graphique de RTMaps	129
5.16	Nombre de conducteurs par catégorie (a) : Nombre de conducteurs en fonction de la connaissance du trajet (b) : Nombre de conducteurs ayant participé à une autre expérience d'éco-conduite au LIVIC	131

5.17	Différents états de fonctionnement de l'IHM pendant le test (a) : La conduite est en adéquation avec les consignes (b) : La vitesse est en dessous de la vitesse conseillée et passer au rapport supérieur est conseillé (c) : La vitesse en adéquate, le rapport supérieur est demandé (d) : La vitesse est trop élevée, le rapport supérieur est conseillé (e) : Le véhicule est trop proche du véhicule de devant (f) : Désactivation de l'interface à l'approche d'un événement.	133
5.18	Profils optimaux dans le cas de libre circulation	137
5.19	Différents profils de vitesse des deux conducteurs	138
5.20	Profils de vitesse et de couple moteur du conducteur B	139
5.21	Vitesses du véhicule suiveur de différents conducteurs (en trait solide) et distance inter-véhiculaire (en pointillés)	141
5.22	Relation entre la différence du pourcentage des dépassements de la vitesse et la différence du temps de trajet	143
5.23	Vitesse maximale en virage définie avec des accélérations latérales et longitudinales moyennes	144
5.24	Ensemble de profils de vitesse. Les vitesses d'un même conducteur sont de mêmes couleurs. En traits plein sont les vitesses enregistrées avec le système et en pointillés celles sans le système.	145
5.25	Respect de la vitesse maximale en virage - cas du conducteur D	145
5.26	Profils de vitesse sur le parcours du conducteur S	147
5.27	Profils de vitesse du conducteur S	147
5.28	Profils de vitesse du parcours du conducteur C	148
5.29	Consommation moyenne en fonction de la vitesse de croisière d'un véhicule léger	149
A.1	Exemple de trajet enregistré dans le cadre du projet LAVIA	166
A.2	Détermination du rapport engagé à partir du rapport entre la vitesse longitudinale et le régime moteur	167
A.3	Reconstruction de la consommation cumulée issue du bus CAN	168
A.4	Installation du débitmètre dans le véhicule Renault Clio Eco2	169
A.5	Consommation cumulée mesurée par le débitmètre et issue du bus CAN d'un trajet d'essai	169
A.6	Consommation cumulée d'un trajet d'essai - problème de décalage temporaire entre les données du bus CAN et du débitmètre	170
A.7	Version de l'IHM avec reconstruction d'un horizon de prédiction	171
A.8	Évolution de l'IHM	172
A.9	Version avec une répartition des zones	172
A.10	Illustration de l'attraction	173
A.11	Illustration du phénomène de réticence	175
A.12	Allure de sign(s) et de sat(s)	175

Notations

1 Acronymes

Symbole	Dénomination
<hr/>	
GES	Gaz à Effet de Serre
CO_2	Dioxyde de Carbone
CH_4	Methane
NEDC	New European Driving Cycle
ESC	European Stationary Cycle
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global
MDD	Modern Drive Devices
ACC	Adaptative Cruise Control
ISA	Intelligent Speed Adaptation
FDW	Following Distance Warning system
GERICO	Gestion de l'Energie paR Interface COnducteur
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
UTAC	Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
SAV	Système d'alerte en virage

Introduction

1 Contexte général

Aujourd'hui, le changement climatique devient une préoccupation mondiale. Des études ont confirmé l'existence d'un lien étroit entre ce phénomène et l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère de notre planète. Actuellement, la production et l'utilisation des énergies fossiles sont les principales sources d'émission des gaz à effet de serre dont le dioxyde de carbone (CO_2), dans le monde entier. Réduire l'effet de serre anthropique dans ce contexte doit nécessairement passer par une réduction des émissions de ces sources.

Le protocole de Kyoto, signé en 1997 et ratifié par 183 pays en 2010, s'agissait d'un premier traité international visant la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Il est entré en vigueur en 2005 à Montréal. Depuis, il fait l'objet de nombreuses négociations entre les différentes parties visées pour avoir des actions et des engagements plus concrets. Que ce soit de la part des pays qui ont déjà ratifié le traité ou des pays qui ne l'ont pas encore approuvé, notamment les Etats-Unis et les pays en développement. La feuille de route de Bali, associée au plan d'action de Bali, définie en 2007 en Indonésie, fait partie de ce processus de négociation dans lequel de nombreux pays industrialisés et en développement, se sont accordés pour s'efforcer de lutter contre le changement climatique. Elle comprend des décisions tournées vers l'avenir et devait être finalisée en 2009 pour pouvoir succéder au protocole de Kyoto qui prendra fin en 2013. Cependant, le sommet de Copenhague en 2009 n'a pas abouti aux accords attendus par les scientifiques et est considéré comme un recul dans la lutte contre le réchauffement climatique au niveau mondial. Cet échec est dû aux nombreux facteurs qui sont liés principalement aux conflits d'intérêts financiers des différents pays. Néanmoins, les parties visées se sont mises d'accord pour poursuivre le processus de négociation afin d'aboutir à des résultats plus concrets dans les mois qui viennent. Même si la prolongation du protocole de Kyoto n'est pas encore à l'ordre du jour, on peut espérer et croire au changement d'attitude des parties concernées pour le bien écologique de la planète. En attendant, tous les secteurs d'activité dans chaque pays doivent s'efforcer d'améliorer leur rendement énergétique et réduire leur dépendance aux énergies non renouvelables, notamment les énergies fossiles. Cela dans le but de satisfaire des engagements actuels et aussi d'anticiper les engagements beaucoup plus contraignants des années à venir.

Dans ce contexte, le domaine du transport, et particulièrement le secteur du transport routier ne peut pas échapper à cette tendance. En étant la première source émettrice de CO_2 parmi toutes les branches du secteur du transport, qui est lui même le deuxième plus gros émetteur de CO_2 avec 6,6 Gt en 2008 [Age09, Age10], le transport routier doit redoubler d'effort pour réduire son impact environnemental. Dans le cadre de notre étude, on s'intéresse plus particulièrement au secteur de l'automobile. C'est un des secteurs qui se montrent les plus actifs dans la lutte contre la pollution atmosphérique. Les efforts et les avancées de technologies de ce domaine permettent d'introduire sur le marché des véhicules de plus en plus verts et respectueux de l'environnement. Les concepts les plus en vogue en ce moment sont évidemment électriques et hybrides. Cette

tendance est clairement reflétée lors du "Mondial de l'automobile 2010 à Paris" avec la mise en avant par la plupart des constructeurs de leurs modèles hybrides ou électriques. Cependant, si la réduction de la quantité des polluants par kilomètre parcouru de ces véhicules est incontestable, la réduction des émissions de CO_2 sur l'ensemble du cycle de vie de ces véhicules reste un sujet en discussion [Gre10]. De plus, des limites techniques et technologiques font qu'il reste un délai encore très important avant que ces véhicules remplacent nos véhicules conventionnels actuels. Mais ces véhicules sont, en tout cas, de très bonnes alternatives pour réduire la dépendance de nos déplacements aux énergies fossiles.

Ces efforts provenant des constructeurs et de la classe politique reflètent aussi la prise de conscience du problème écologique par les citoyens d'aujourd'hui. L'impact environnemental commence à devenir un critère de choix des véhicules par les automobilistes. Répondre à cette exigence nécessite de concrétiser les engagements écologiques mais aussi d'améliorer l'image de la marque et l'intérêt économique de chaque constructeur. A côté du choix de véhicule, on remarque aussi la tendance des automobilistes à mieux utiliser leurs véhicules. Cette bonne volonté d'adapter leurs besoins de déplacement et leur style de conduite au type de véhicule existe réellement mais reste encore très minoritaire parmi les conducteurs. Pourtant, cette mesure représente un potentiel d'économie de carburant très conséquent en comparaison avec les différents efforts réalisés par les constructeurs. De nombreuses études montrent que par un bon comportement, le conducteur peut réduire sa consommation de carburant de 15 à 20% [CEHW79, JFE99, SPA10a, RSM⁺06, Ver06, aW02, CIE07]. Cela représente un gain significatif de quantité de carburant non brûlée et donc des émissions de CO_2 en moins et d'économie de dépenses en plus. Et sur une plus grande échelle, ce gain en terme d'écologie et d'économie ne doit pas être pris à la légère. Dans un contexte où les solutions techniques et technologiques montrent souvent une grande inertie pour être intégrées dans les véhicules actuels, aider les conducteurs à adopter une conduite mieux adaptée à son véhicule et au trajet devient alors une solution facile à déployer, moins coûteuse et efficace. Surtout, elle demeure une solution intéressante pour des nouveaux types de véhicule.

2 Objectifs et contribution

Pour aider le conducteur à adopter un style de conduite écologique, le développement d'un système d'aide à la conduite écologique est la solution choisie. Il se place dans la continuité des travaux de recherche menés au LIVIC. L'objectif principal de la thèse est donc le développement et l'implémentation d'un système embarqué d'aide au conducteur lui permettant de réduire sa consommation de carburant tout en assurant sa sécurité.

Il faut noter qu'il existe déjà des systèmes d'assistance à la conduite écologique sur le marché. Nos sources de motivation et les nouveautés qu'on souhaite apporter dans cette thèse sont les suivantes :

1. Actuellement, la plupart des systèmes EDAS proposés sur le marché sont connus sous le concept que les auteurs dans [vMvdVvD02] ont appelé MDD (Modern Drive Devices). Ce concept consiste à enregistrer les informations du véhicule le long du trajet. Les conseils d'éco-conduite sont donnés soit en temps réel sur les supports de type Smartphones (iPhone, GPS) ou en différé sous forme des tableaux récapitulatifs après que les données enregistrées auraient été traitées par les logiciels propriétaires installés par avance sur un ordinateur. Il s'agit, pour la plupart, de systèmes informatiques basés uniquement sur la dynamique longitudinale du véhicule (la vitesse et l'accélération), calculée grâce aux accéléromètres intégrés dans les supports et aux positions GPS ou recueillies via le bus CAN. Si les conseils

sont donnés en temps réel, ils sont plutôt des retours du comportement du conducteur à des instants passés qui ne sont pas forcément adaptés aux événements futurs. Ils se limitent aussi aux conseils de type "Modérer votre accélération !" ou à l'affichage des paramètres du trajet (consommation instantanées, distance parcourue...). Les conseils différés, quant à eux, sont souvent très spécifiques et ne sont pas forcément facilement compréhensibles par tout le monde. Ils sont plutôt destinés à des gestionnaires de flottes ou des formateurs d'éco-conduite. À l'heure actuelle, aucune étude ne permet de confirmer l'efficacité de ces systèmes. On souhaite construire un système qui soit capable de fournir au conducteur le retour de ses actions et en même temps lui conseiller sur ce qu'il doit faire en temps réel. On étudie ensuite son efficacité en terme d'économie de carburant.

2. Le deuxième concept que l'on appelle les "Systèmes embarqués écologiques" demande davantage de connaissances spécifiques du véhicule (cartographie du moteur, rendement du système de transmission,...) qui ne sont pas forcément disponibles au grand public. Cela explique en partie pourquoi ces systèmes sont uniquement développés par les équipementiers automobile. De plus, le peu de systèmes existants sont tous conçus pour les véhicules hybrides. Aucun système n'est disponible pour les véhicules traditionnels ou les véhicules lourds. Le nombre de travaux de recherche dans ce domaine est aussi très limité. L'impact d'un tel système sur ces types de véhicules ne sont pas forcément bien connu. On souhaite donc développer un système embarqué pour ces types de véhicules et dans un premier temps pour les véhicules légers à essence.
3. La stratégie utilisée pour un véhicule hybride n'est pas forcément adaptée à un véhicule à moteur thermique. En effet, le fait d'avoir une autre source d'énergie permet d'utiliser une approche locale de recherche des meilleurs points de fonctionnement du moteur thermique à conseiller au conducteur. Ce qui n'est pas forcément possible pour le cas des véhicules conventionnels. Dans ce cas, une approche globale avec l'utilisation de l'horizon électronique est nécessaire. Par conséquent, on passe d'une approche qui tient compte juste les caractéristiques du véhicule à un concept qui intègre à la fois le véhicule et l'infrastructure.
4. Finalement, pour que le système soit accepté par les conducteurs, les consignes données doivent être claires, compréhensibles et surtout cohérentes avec la situation dans laquelle se situe le véhicule. Pour atteindre cet objectif, la prise en compte du trafic et des problèmes de sécurité est alors un élément essentiel. Ce nouveau concept inclut alors à la fois le véhicule, l'infrastructure et le trafic. En terme de stratégie, on souhaite développer un système qui permet le conducteur de "réduire sa consommation tout en assurant sa sécurité".

Ces quatre points montrent l'intérêt du développement d'un nouveau système d'aide à la conduite écologique. Ce développement combine les aspects conceptuels, stratégiques et aussi en termes d'étude et d'analyse de résultats. Les objectifs de la thèse se résument alors comme suit :

1. Concevoir et implanter un système d'aide à la conduite écologique
 - Embarqué sur le véhicule
 - Informatif et suggestif dans un premier temps
 - Adapté au véhicule léger et au poids lourd
 - et surtout plus sûr
2. Étude et Analyse des gains en économie de carburant et en amélioration de la sécurité du système

Ces objectifs sont atteints. La conception et l'analyse des différents aspects du système à travers les résultats de simulation et d'expérimentation sont présentées dans les sept chapitres de ce mémoire.

3 Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé suivant la décomposition des tâches réalisées pour atteindre l'objectif fixé.

Il commence par définir les objectifs et présenter le contexte, les motivations de nos travaux dans le chapitre "Introduction".

Ensuite, le chapitre 1, intitulé "État de l'art" présente un aperçu des mesures prises et envisagées pour réduire l'impact environnemental du transport routier. Cela nous permet de justifier notre approche qui consiste à aider le conducteur à adopter le comportement éco-responsable. Une revue détaillée des solutions techniques de cette approche renforcent une fois de plus nos motivations et justifient nos stratégies définies précédemment.

Les trois chapitres qui suivent présentent les différentes étapes de la conception du système.

La première étape concerne la modélisation longitudinale et la modélisation de la consommation de carburant du véhicule dans le chapitre 2, intitulé "Modélisation du véhicule et de la consommation". Le but du chapitre est d'obtenir un modèle de prédiction du mouvement longitudinal du véhicule et un moyen simple d'évaluer la consommation instantanée de carburant.

Ces modèles sont ensuite utilisés dans le chapitre 3 dont l'objectif est de formuler le problème d'optimisation d'économie de carburant et de choisir la méthode la plus adaptée aux différents contraintes du problème. Ce chapitre "Problème d'optimisation de consommation de carburant" présente un problème d'optimisation classique mais qui comporte des spécificités et des difficultés intéressantes à étudier. Le choix de la programmation dynamique est justifié par comparaison à d'autres méthodes d'optimisation dans un cas d'étude simple.

Dans le chapitre 4, cette méthode est ensuite améliorée pour construire la stratégie finale qui consiste à tenir compte des problèmes de sécurité, du temps de trajet, du confort du passager parallèlement au problème de minimisation de la consommation de carburant. Le chapitre est appelé "Vers un système d'aide à la conduite écologique et sécuritaire". On y a résolu un problème multi-objectif avec l'étude de l'influence de chaque élément dont la consommation, le temps du trajet, le confort du passager et la pente de la route. Une fois l'étape terminée, les différentes stratégies sont appliquées pour obtenir une stratégie de calcul en ligne. C'est sur cette base que le problème du respect de la distance entre véhicules est résolu. C'est aussi le point qui complète notre stratégie permettant de satisfaire les objectifs fixés concernant le système.

Les questions liées à l'expérimentation de la stratégie conçue sont présentées dans le chapitre "Expérimentation". Ce chapitre 5 commence par la présentation de la conception de l'interface Homme-Machine permettant de communiquer les consignes du système au conducteur. La mise en place de l'expérimentation est ensuite détaillée. Les résultats de tests sur les pistes d'essais et sur une boucle routière dans les Yvelines sont expliqués, suivis des analyses sur l'efficacité du système en termes d'économie de carburant et d'amélioration de sécurité. C'est ainsi qu'à travers ce chapitre on apporte des éléments de réponse à certaines interrogations notamment sur la facilité du suivi des consignes et l'acceptabilité du système par les conducteurs.

Le chapitre "Conclusion" nous permet de faire un bilan sur ce qui a été réalisé et sur ce qui reste à améliorer et à étudier dans le développement des systèmes d'aide à la conduite écologique et sécuritaire. Il clôt finalement ce mémoire présentant une expérience scientifique et personnelle très enrichissante.

Chapitre 1

État de l'art

Sommaire

1.1 Mesures de réduction de consommation dans les transports	5
1.1.1 Généralités	5
1.1.2 Mesures politiques	11
1.1.3 Avancées technologiques	12
1.1.4 Éco-conduite	13
1.2 Systèmes d'aide à la conduite écologique	15
1.2.1 Concepts	15
1.2.2 Systèmes commercialisés	19
1.2.3 Gains en économie de carburant	24
1.3 Discussion sur la consommation des véhicules lourds	25
1.4 Conclusion	26

1.1 Mesures de réduction de consommation dans les transports

1.1.1 Généralités

Le développement rapide des transports permet de répondre à nos besoins de déplacements en augmentant ces dernières décennies. Il nous met en même temps dans la nécessité de recherche constante de solutions pour faire face à des problèmes qui leur sont liés. Parmi eux, le réchauffement climatique dû à des gaz à effet de serre du secteur du transport routier est une problématique qui attire toutes les attentions.

En effet, bien que les voitures soient de plus en plus propres, la quantité de polluants qui réchauffe notre planète ne cesse d'augmenter. D'après les scénarios développés par World Energy Outlook 2009 [Age], les émissions de CO_2 atteindront 40,1 Gt en 2030, avec un taux de croissance annuel de 1,5%. Cela intensifie encore plus les effets néfastes du réchauffement climatique pour lequel le secteur du transport a une part de responsabilité importante. Il est un grand consommateur d'énergie et sera la cause de 97% de l'augmentation de demande d'énergie fossile d'ici 2030. Au niveau mondial, il représente le deuxième secteur émetteur avec 6,6 Gt de CO_2 sur les 29,38 Gt d'émissions mondiales tous secteurs confondus en 2008 et peut atteindre 18 Gt en 2050 selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie [IEA08a, Age10].

Il faut souligner que le CO_2 est aussi le principal responsable du réchauffement climatique. Même si son pouvoir de réchauffement global (PRG) de 1 est très faible par rapport aux autres gaz

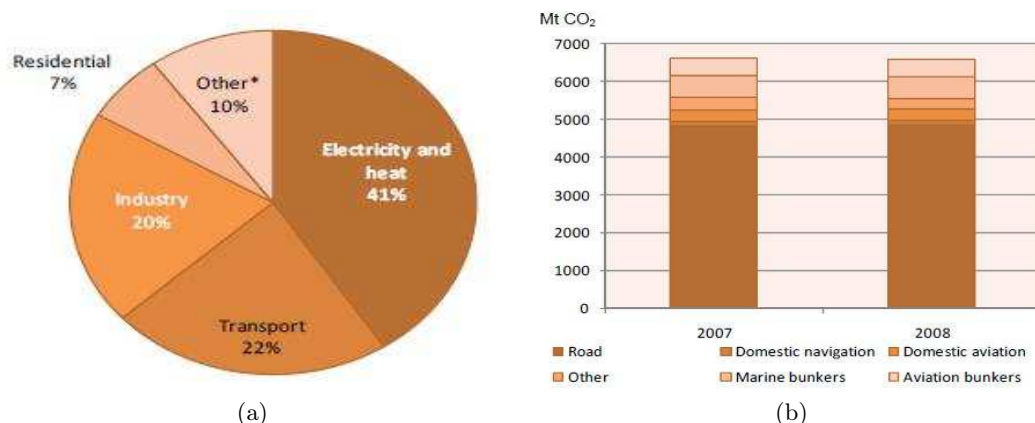


FIG. 1.1: Émissions mondiales de CO₂ en 2008 par secteurs (a) et du secteur du transport (b) (source [Age10])

à effet de serre (25 pour le méthane CH₄, 296 pour le protoxyde d'azote,...), sa nette domination dans la composition des GES du secteur (figure 1.2) justifie largement l'importance des recherches allouées à sa réduction. Surtout dans le contexte où le parcours moyen par véhicule est seulement en légère baisse et que le parc français des véhicules usuels atteint les 37 millions de véhicules [CCF09].

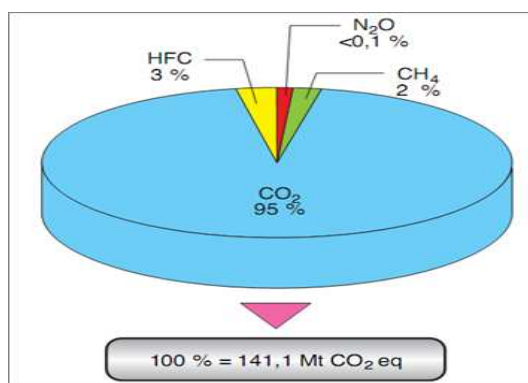


FIG. 1.2: Émissions des gaz à effet de serre dans le transport routier en France en 2006. Cette proportion reste peu changée jusqu'à aujourd'hui

Ce sont ses efforts en recherche et développement qui permettent au secteur de répondre à ce challenge. Avec les améliorations du rendement énergétique du moteur, l'évolution de l'aérodynamique et l'utilisation de matériaux plus légers, le véhicule d'aujourd'hui devient plus propre et moins gourmand en carburant. Par ailleurs, avant de regarder l'évolution de la consommation moyenne de carburant des véhicules en France, on propose de distinguer la consommation réelle de la consommation conventionnelle.

Consommation conventionnelle et consommation réelle

En effet, en Europe comme ailleurs dans le monde, un nouveau modèle du véhicule mis

sur le marché doit d'abord passer des tests d'homologation concernant le rejet des polluants et la consommation de carburant. Et c'est la consommation moyenne en $l/100$ km (en Europe) mesurée lors de cette série de tests, appelée aussi "la consommation conventionnelle", qui est donnée comme information voire comme argument de vente aux consommateurs. En France, c'est l'Union Technique de l'Automobile, du motocycle et du Cycle (UTAC) qui est chargée de la mise en œuvre de cette procédure. Elle est appliquée au véhicule léger et non au poids lourd. La consommation et les émissions sont mesurées sur un banc d'essai équipé d'un système à rouleaux. Le véhicule est soumis à un cycle standard de changements de rapport, de ralentissements et de périodes à vitesse constante. Ce cycle, appelé "cycle de test ECE + EUDC" ou encore NEDC (pour New European Driving Cycle), est utilisé pour les véhicules dans la zone Euro. Il est ainsi présenté sur la figure 1.3.

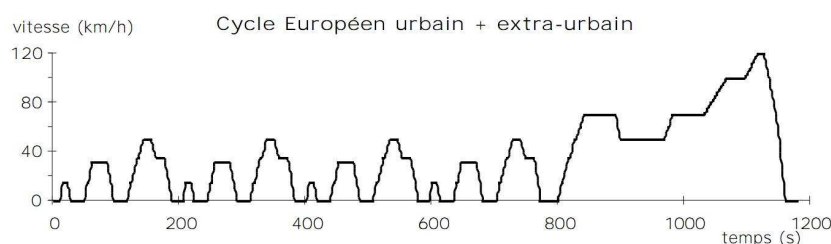


FIG. 1.3: Cycle Européen urbain et extra-urbain ECE-EUDC (source [JAV⁺99])

Le principe de ce cycle est un profil de vitesse comportant des phases d'accélération, de décélération et du maintien de la vitesse constante d'une durée de 20 minutes avec 800 secondes en conduite urbaine et 400 secondes en conduite extra-urbaine. Les tests d'homologation des véhicules neufs se déroulent de la façon suivante [Wik] : la vitesse à tout moment du test doit être maintenue dans un certain écart de tolérance autour de la consigne. Le cycle doit être effectué sur un véhicule froid à une température de 20°C. Pour chaque configuration de véhicule, une courbe appelée « loi de route » est appliquée : à chaque vitesse correspond une certaine valeur de résistance (couple inverse appliqué aux roues motrices). Ce mécanisme permet également de tester avec un même véhicule physique toutes ses variantes de carrosseries (berline, break, coupé, monospace...), par simple changement de la loi de route. Un système de soufflerie couplé au banc permet de fournir aux entrées d'air du moteur un débit représentatif de la vitesse pratiquée (figure 1.4).

Ce mécanisme permet d'effectuer un grand nombre d'essais au cours des phases de développement des véhicules et de leurs moteurs. Les chiffres généralement publiés à destination du grand public sont la consommation urbaine qui est mesurée sur les 800 premières secondes, la consommation extra-urbaine qui est mesurée de 800 à 1 200 secondes. La consommation mixte et la production de CO_2 sont celles mesurées sur l'ensemble du cycle.

Pour les camions, les essais ne portent pas sur le véhicule achevé, mais se limitent au seul moteur. En effet, celui-ci peut trouver place dans une variété de véhicules, destinés à des applications différentes, dans des conditions très diverses. Il est très difficile de mettre au point un test général ; ces véhicules devraient presque être évalués individuellement. Le nombre de configurations possibles, allié au fait que les camions reçoivent souvent leur forme définitive dans des ateliers de carrosserie indépendants, augmenterait considérablement les frais d'homologation, sans que l'on dispose pour autant d'informations pertinentes. Le moteur est donc mis au banc d'essai pour subir une série de charges - le cycle ESC - en tournant à un régime déterminé et en délivrant un couple constant.



FIG. 1.4: Banc à rouleaux homologation avec le système de soufflerie (source UTAC)

Si le cycle Européen est considéré comme satisfaisant pour représenter une conduite douce avec la prise en compte des effets aérodynamiques, il ne prend pas en compte l'utilisation de la climatisation, par exemple. Pour faire face à ce défaut, on utilise plusieurs cycles différents (figure 1.5) pour représenter les différentes conduites aux États-Unis : le cycle standard FTP75, le cycle SCO3 pour une conduite avec climatisation, US06 pour une conduite agressive...

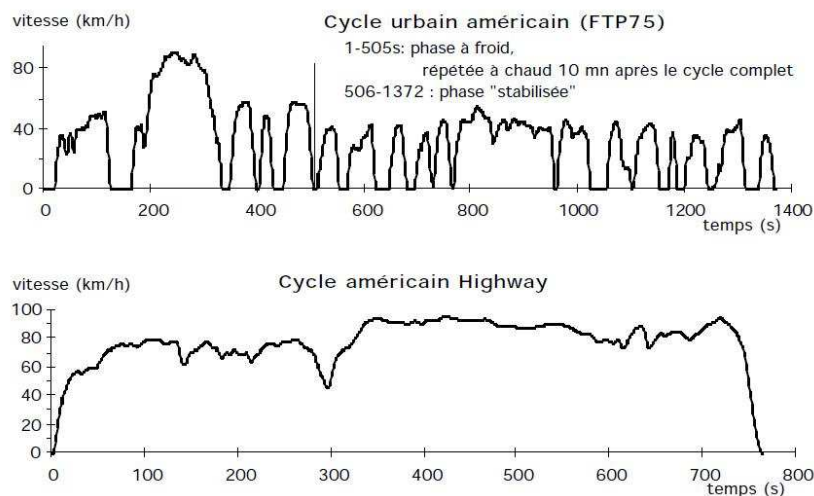


FIG. 1.5: Cycle américain FTP75 (urbain) et US Highway (interurbain) pour les véhicules légers (source [JAV⁺99])

Cela explique aussi que la consommation d'un même véhicule puisse être différente suivant le pays. Il est plus raisonnable de regarder l'évolution de la consommation des véhicules dans les mêmes conditions de mesures. Dans notre cas, c'est la consommation moyenne des véhicules en France qui sera utilisée.

La consommation réelle quant à elle est la consommation enregistrée lors des passages à la pompe à essence. En France, le panel SECODIP permet de suivre les consommations de 3300 voitures appartenant à des particuliers résidant en France depuis 1987 [dledS]. Un carnet avec relevé du kilométrage au compteur qui est renseigné lors de chaque retrait de carburant à la

pompe est mis en place avec l'accord des automobilistes. Cette enquête permet donc de calculer la consommation moyenne réelle d'une voiture particulière en circulation.

La figure montre l'évolution de la consommation moyenne conventionnelle (figure 1.6a) et réelle (figure 1.6b) des véhicules en France ces vingt dernières années [CCF09, ADE09a, dledS].

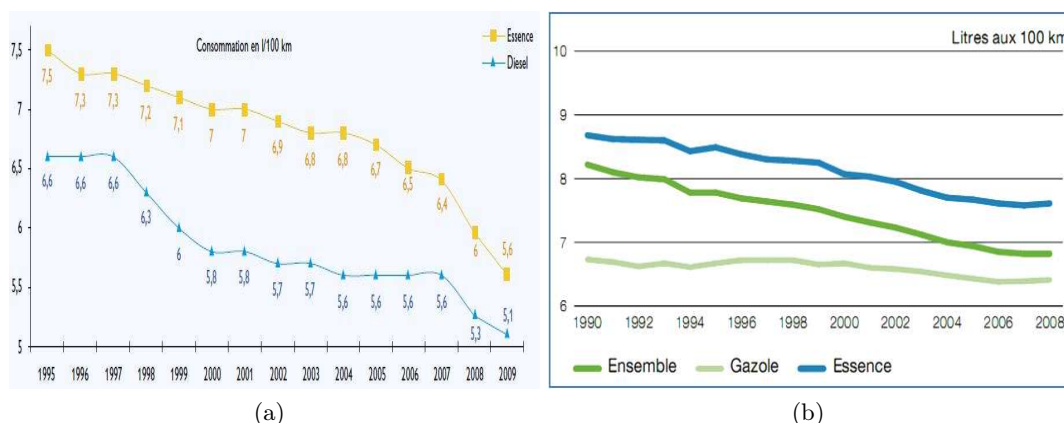


FIG. 1.6: Évolution de la consommation unitaire moyenne des véhicules en France. (a) : Consommation conventionnelle (source ADEME) ; (b) : Consommation réelle (source Bilan de circulation)

On remarque que la consommation est en baisse constante depuis ces vingt dernières années. La consommation réelle connaît une baisse aux alentours de 8% pour les véhicules essence entre 1995 et 2005 (1.3% pour les diesels) tandis que la consommation conventionnelle connaît un gain beaucoup plus fort (25.3% pour les véhicules à essence et 22.7% pour les diesels entre 1995 et 2005) (source ADEME, panel carburant TNS/SECODIP). L'explication est donnée par le fait que les avancées technologiques permettent de réduire considérablement la consommation. Mais dans le même temps, le fait d'ajouter des systèmes complexes pour améliorer le confort et la sécurité va à l'encontre des bénéfices de ces derniers développements.

Ensuite, on voit une différence conséquente entre la consommation réelle et la consommation conventionnelle. Les cycles sont censés représenter la consommation moyenne d'un automobiliste européen. Il va de soi que les conditions ne sont pas les mêmes partout et pour tous. De plus, le cycle ne prend pas en compte par exemple l'utilisation des accessoires (climatiseur, GPS,...), le trafic (trafic fluide ou embouteillage...), Le détail des facteurs de surconsommation est présenté dans ce qui suit.

Facteurs de surconsommation

La consommation du véhicule dépend de plusieurs facteurs qui peuvent relever de trois catégories en lien avec : le véhicule, les conditions opérationnelles d'exploitation et le conducteur.

Les paramètres relatifs au véhicule proprement dit sont l'aérodynamique du véhicule, le moteur, le système de transmission, les systèmes électroniques, les pneumatiques (résistance au roulement), les systèmes supplémentaires (climatisation, GPS...). Les études de l'ADEME [ADE09a] et de l'ENERGECO [Ene] identifient ces facteurs comme des sources potentielles de surconsommation de carburant du véhicule. Le fait de ne pas entretenir le moteur expose le propriétaire aux risques d'affronter des pannes coûteuses... et d'entraîner une importante surconsommation de carburant (pouvant aller jusqu'à 25%, soit environ 2 l/100 km supplémentaires). Un sous-gonflage

des pneus entraîne une augmentation de la résistance au roulement et donc une surconsommation de carburant. Les données de Michelin font d'état d'une surconsommation d'environ 1,2% pour un sous-gonflage de 0,3 bar. Ou encore, le fait d'augmenter la résistance aérodynamique du véhicule avec une galerie (ou des barres de toit), même à vide, peut augmenter la consommation de 10%. Ce chiffre peut atteindre les 15% (1l/100km supplémentaire à 120 km/h) une fois la galerie chargée. Un dernier exemple et non le moindre, concerne l'utilisation d'équipements supplémentaires, qui semble extrêmement coûteuse en carburant. L'intégration des systèmes complexes pour améliorer la sécurité et le confort induit donc une consommation supplémentaire. Quand elle fonctionne, la climatisation augmente la consommation de carburant de 6% sur autoroute pour un écart de température inter-externe de 5 ° et atteint jusqu'à 20% en ville. L'impact énergétique de la climatisation limite l'effet des progrès importants réalisés par les constructeurs pour réduire la consommation des véhicules. Dans les prochaines années, l'évolution prévisible du parc automobile laisse envisager une augmentation de la proportion des voitures climatisées, confortant la tendance à l'augmentation des consommations, ce qui va à l'encontre des politiques menées actuellement pour limiter les consommations d'énergies fossiles.

La deuxième catégorie concerne l'ensemble des facteurs liés aux conditions d'exploitation opérationnelle du véhicule. Ils comprennent le type de trajet (urbain, inter-urbain dont une des caractéristiques est la fréquence des arrêts), le type de route (montagne, planéité, sinuosité,...), les conditions du trafic, la géométrie de la route (la pente, la rugosité,...). Même si peu d'études quantifient la différence de consommation entre différents types de trajets, on se doute bien que la consommation n'est pas la même sur une route plane et sur une route avec relief, de même entre une route droite et une route avec des virages fréquents. Une augmentation de 15 à 20% de la consommation de carburant en hiver par rapport à l'été est notée en Europe [Bak95]. Finalement, la consommation dans un embouteillage s'avère très élevée par rapport à la consommation en trafic fluide. L'ADEME annonce le chiffre de près de 16 l/100km pour un véhicule de gamme moyenne.

La troisième catégorie concerne donc le conducteur. En plus de la maintenance de son véhicule, sa conduite peut engendrer des sur-consommations non négligeables. Dans [NRC95], on constate que la conduite agressive (accélération et décélération brutales) en situation de congestion est estimée engendrer une augmentation de 10% de la consommation. De même, avec la vitesse et la transmission, la variation entre conducteurs peut atteindre 20% due à la différence de l'utilisation des boîtes de vitesse [Din00]. Les véhicules d'aujourd'hui connaissent beaucoup de changement par rapport aux générations précédentes, et par conséquent, le conducteur doit lui aussi adapter sa conduite à la performance offerte par son véhicule. Cela fait partie de la tendance d'une conduite écologique qui d'après plusieurs études [CEHW79, BBD⁺09, BB09, CIE07, JFE99, RSM⁺06, OEE98] permet d'obtenir un gain de consommation de 15 à 20% en augmentant en même temps le confort et en diminuant aussi les risques d'accidents. Cette éco-conduite va être présentée plus en détails dans la suite du document.

Finalement, il paraît clair que le développement des transports a une part de responsabilité dans le réchauffement climatique. Réduire la consommation et les émissions de ce secteur s'annonce comme une tâche difficile et un vrai défi pour tous les acteurs concernés. Il faut à la fois conserver la liberté de déplacement offerte par le transport routier et diminuer son impact environnemental. C'est un défi à la fois technologique et social que l'on doit relever avec la participation de l'ensemble des acteurs : les politiques, les constructeurs, les automobilistes, les gestionnaires du trafic et de l'infrastructure,...L'ensemble des éléments donnés (certainement non exhaustifs) permet d'avoir une première idée des sources potentielles de réduction de la consommation et des émissions dans le transport. Par la suite, on présente certaines mesures qui sont prises en Europe pour contribuer à relever ce défi.

1.1.2 Mesures politiques

Les mesures politiques comprennent les mesures permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules et les mesures pour influencer la façon de les utiliser.

Sans vouloir classer les mesures en différentes catégories, on trouve que les premières mesures concernent plutôt les constructeurs automobiles et les équipementiers. Elles les incitent à fournir des efforts dans la recherche et développement pour satisfaire à des contraintes de plus en plus contraignantes dont le but est de réduire l'impact environnemental du secteur automobile.

Une des premières mesures consiste à définir des normes anti-pollution en automobile. Si la présence du catalyseur pour réduire les effets toxiques des rejets automobiles est rendu obligatoire par l'état américain de Californie depuis 1975, il n'est que progressivement apparu en Europe pour les voitures à fortes cylindrées à partir de la fin des années 1980 et n'est devenu obligatoire sur toutes les voitures neuves qu'à partir du premier janvier 1993. Cela coïncide avec l'entrée en vigueur de la norme Euro 1. Aujourd'hui, tous les véhicules neufs doivent répondre à des contraintes fixées par la norme Euro 5 qui est en vigueur depuis le premier septembre 2009. L'évolution des normes européennes montre une volonté de plus en plus grande des instances politiques d'obtenir des constructeurs des véhicules de plus en plus propres et respectueux de l'environnement. Concrètement, ces normes définissent des seuils en terme de quantité de polluants rejetés par les véhicules au-delà desquels le véhicule ne sera pas homologué. Elles ne concernent que les gaz les plus toxiques pour l'homme à savoir le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), les hydrocarbures non méthaniques (NMHC), les oxydes d'azote (NOx), HC + NOx et les particules. On y remarque l'absence du CO_2 . En effet, ce gaz à effet de serre, toxique pour l'homme à partir de 5000 ppm est réglementé par d'autres directives.

En Europe, la Commission Européenne a trouvé un accord avec les constructeurs en décembre 2007 pour fixer un objectif de 130 grammes de CO_2/km pour les véhicules neufs immatriculés dans l'Union Européenne. La valeur limite d'émission ne s'applique pas à chaque véhicule individuellement, mais à la moyenne de tous les véhicules conçus par un constructeur enregistré dans l'UE en un an. A partir de 2012, les constructeurs qui ne respectent pas cet objectif doivent payer "une prime sur les émissions excédentaires". Dans cette continuité, la Commission Européenne propose aussi des programmes de soutien à la recherche et au développement pour réduire les émissions de CO_2 à 95 g par km d'ici à 2020. Des dispositifs équivalents existent aussi ailleurs. Aux États-Unis, la loi Energy Independence and Security Act de 2007 requiert une norme d'économie de carburant de 35 miles par gallon (6.72 l/100km) en 2020 [IEA08b].

Concernant les mesures pour influencer l'utilisation des véhicules, elles ont pour objectif de stimuler une réflexion éco-responsable des automobilistes. Celles-ci consistent à la fois en des mesures volontaires, réglementaires, des incitations financières et des mesures pour renforcer la prise de conscience des consommateurs. Plusieurs mesures ont été prises par le passé, certaines ont été maintenues et d'autres renouvelées.

La directive Européenne 1999/94/EC oblige les constructeurs à afficher les étiquettes pour informer les acheteurs de la consommation de carburant et des émissions de CO_2 des modèles proposés. Un guide annuel doit être élaboré pour guider les consommateurs à propos des émissions et consommations des nouveaux modèles. Cette pratique peut réduire la consommation de l'ensemble des véhicules de 4 à 5% grâce à la prise de conscience des consommateurs [WEC08]. Les nouvelles législations donnent encore plus de précisions pour ce dispositif qui par exemple oblige un affichage comparatif de la consommation et des émissions du véhicule par rapport à des normes fixées par l'UE.

Les incitations financières sont quant à elles l'ensemble des mesures qui consistent à encourager les consommateurs à renouveler le parc de véhicules en changeant les vieux véhicules

gourmands en consommation par des véhicules plus propres. Elles peuvent être matérialisées par une prime à la casse dans certains pays (la France(1994-1996) renouvelée entre 2009 et 2010, l'Espagne (depuis 1994),...) ou encore par une prime à l'achat d'un véhicule neuf. Il existe par exemple en France un système de bonus-malus et super bonus. Le principe est simple. Un bonus écologique sera versé à la première immatriculation pour tout achat d'un véhicule particulier neuf émettant moins de 130 g de CO_2 par km . Le bonus sera complété d'un "superbonus" de trois cents euros lorsque l'acquisition du véhicule écologique s'accompagnera de la mise au rebut d'un véhicule vieux de plus de 15 ans.

Des mesures un peu plus radicales consistent à taxer les déplacements automobiles ou tout simplement les interdire dans une certaine zone. Le système de péage sur les autoroutes permet de financer la maintenance des infrastructures mais aussi de susciter la réflexion de la part des conducteurs avant de se déplacer sur les routes. Il n'est maintenant pas rare que les communes et les villes créent des zones interdites aux véhicules. Cela permet tout simplement de supprimer les pollutions automobiles dans des zones très fréquentées comme le centre ville. A Singapour et à Londres [WEC08], des mécanismes sont installés pour réduire le nombre de véhicules. Dans une zone de 6 km^2 du centre ville, un ticket d'entrée (de 1 euro par jour ou de 20 euros par mois) est nécessaire pour y accéder. Le dispositif est ensuite remplacé par des cartes électroniques installées dans les véhicules en 1998. Cela permet de diminuer le trafic à l'heure de pointe de 45% et d'augmenter l'utilisation des transports en communs de 46% à 65%. A Londres, le dispositif est instauré avec une zone plus large (21 km^2) permettant de réduire le trafic de 15% et la congestion de 30%. Cela conduit à une réduction de 10% de la consommation et de 19% de CO_2 .

Il existe plusieurs autres mesures dans la gestion du trafic qui favorisent le transport en commun et le covoiturage mais qui restent encore dans la phase expérimentale ou bien à une échelle locale. Des voies réservées au covoiturage et aux bus, des parkings gratuits destinés aux personnes en covoiturage sont des exemples de ces mesures. Il est tout de même important de savoir que la gestion efficace du trafic peut réduire la consommation de 5% [Din00].

1.1.3 Avancées technologiques

Les avancées technologiques permettent de réduire considérablement la consommation des véhicules actuels comme souligné dans la partie précédente. Cela permet aux constructeurs automobiles de répondre à des contraintes de plus en plus sévères pour réduire l'impact sur le réchauffement climatique du secteur. Pour construire une voiture moins gourmande en carburant et plus propre, les constructeurs doivent combiner les différentes technologies actuelles. Elles se résument en deux objectifs : augmenter l'efficacité des différents composants de la transmission et réduire les charges tractrices du véhicule (masse, résistance aérodynamique, résistance au roulement...).

Le schéma représentant les différentes pertes d'énergie de General Motors (figure 1.7) montre quels sont les points sur lesquels les ingénieurs peuvent continuer à travailler pour réduire la consommation de carburant.

Sur les voitures conventionnelles, la tendance actuelle consiste à combiner la réduction de la cylindrée, la technique d'injection directe et le turbocompresseur pour réduire la masse et l'efficacité énergétique du véhicule. Ford présente par exemple le moteur EcoBoost qui permet d'améliorer la consommation de 20% avec cette combinaison. Ensuite, la réduction des vitesses au ralenti du moteur permet d'économiser du carburant tout comme le système électronique de retour de carburant utilisé par GM. Le système "Stop and Start" installé sur de nombreux modèles propose une autre solution intéressante pour réduire la consommation du véhicule, surtout sur des trajets avec des arrêts et départs fréquents (urbain, congestion...). La technique consiste

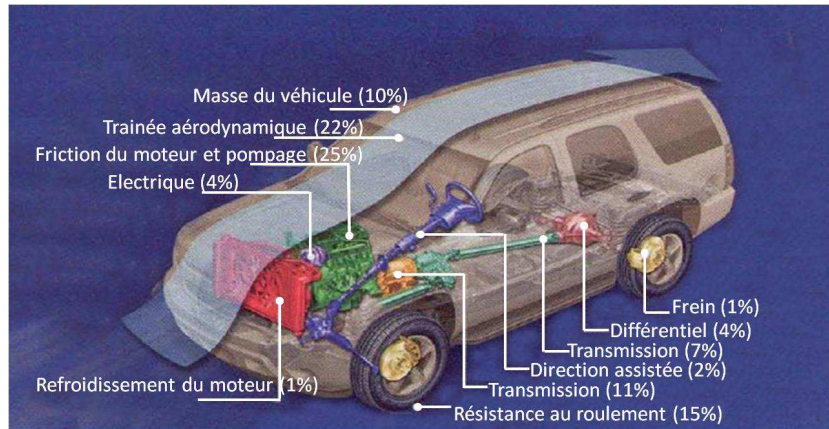


FIG. 1.7: Différentes pertes d'énergie fournies par le moteur [Pon10] d'après GM

à solliciter la pompe de carburant à la demande au lieu de tourner en continu même à l'arrêt. Elle permet une baisse de consommation moyenne de 15% selon les constructeurs.

D'autres alternatives pour remplacer les véhicules conventionnels sont explorées. La technique actuellement en vogue est l'hybridation. Elle consiste à équiper la voiture en même temps d'un moteur électrique et d'un moteur thermique. Cela ajoute à la fois un degré de liberté pour faire fonctionner au mieux le moteur thermique et une capacité à récupérer l'énergie de freinage. Le véhicule électrique permet quant à lui de réduire les émissions à zéro. Son plus grand défaut actuel est son autonomie limitée et le manque d'infrastructures adaptées, mais il reste intéressant pour des courts trajets. C'est sur ces défauts que se concentrent les recherches actuelles. On peut aussi citer les alternatives concernant les bio-carburants, les véhicules à hydrogène,... mais elles restent pour l'instant peu convaincantes aux yeux des automobilistes pour diverses raisons.

1.1.4 Éco-conduite

Comme cité précédemment, le comportement du conducteur a une influence significative sur la consommation de carburant. Plusieurs études montrent qu'en changeant son style de conduite, le conducteur peut gagner de 15 à 20% de carburant [CEHW79, BBD⁺09, BB09, CIE07, SPA10b, JFE99, RSM⁺06]. Avec le kilométrage au compteur d'un véhicule qui s'élève à 107 000 kilomètres, le gain obtenu en adaptant une conduite plus économe se chiffre aux alentours de 1000 litres de carburant par véhicule.

L'éco-conduite est basée sur une sollicitation modérée du véhicule, qui doit être bien entretenu et adapté au besoin de son conducteur. Ce comportement se résume en un ensemble de règles de bonne conduite à apprendre. Ces règles varient en fonction du public ciblé et en fonction du pays. Dans le contexte du projet Ecodrive de l'UE, les règles d'or sont :

1. Passer à la vitesse supérieure dès que possible.
Passer à la vitesse supérieure entre 2.000 et 2.500 t/min
2. Maintenir une allure constante.
Enclencher la plus haute vitesse possible et conduire avec un régime moteur faible.
3. Anticiper le trafic.
Regarder le plus loin possible et anticiper le trafic environnant.
4. Décélérer progressivement.
S'il faut ralentir ou s'arrêter, décélérer progressivement en relâchant l'accélérateur à temps

et en laissant la voiture en prise.

5. Vérifier régulièrement la pression des pneus.

Comme l'étude menée par le LIVIC [SPA10b], la plupart des études menées par Quality Alliance Eco-drive(CH) et le DVR(D), Ford, Mercedes et BMW montrent une réduction importante à court-terme de carburant pour les conducteurs ayant une formation d'éco-conduite mais l'effet à long terme est moins significatif. Elles soulignent aussi les principaux avantages d'une conduite écologique [CIE07] :

- La consommation de carburant peut être réduite de 15% à 20% à court-terme
- À long terme, la réduction de carburant n'est plus que de 4.7 à 8%. Cela est dû au fait que le conducteur reprend ses habitudes de conduite. Les formations de rappel sont alors nécessaires.
- L'éco-conduite réduit aussi les risques d'accident
- Le parcours est plus confortable

Ces résultats montrent un grand potentiel de réduction de la consommation en carburant en adoptant un style de conduite plus éco-responsable. Les conseils pour une conduite écologique sont simples. Mais pour pouvoir pratiquer vraiment ce style de conduite et en tirer des bénéfices, un grand effort est souhaitable de la part des conducteurs. Pour les conducteurs expérimentés, il s'agit peut-être de changer son style de conduite et de maintenir cette nouvelle habitude. Chose qui n'est peut-être pas forcément évidente.

On peut alors se poser la question si l'éco-conduite induit une conduite sécuritaire ?

Plusieurs études tentent de répondre à cette question. D'après les études de GreenRoad [Tec08] dans le cadre des formations et examens, il existe une corrélation directe entre l'éco-conduite et la sécurité. Une conduite prudente peut améliorer la consommation de carburant de 7% à 11%. Les conducteurs "verts" ont moins de risque d'accident que les conducteurs "rouges" (conduite agressive ou imprudente). Mais il existe tout de même certains conflits potentiels entre la conduite écologique et la conduite prudente. Ce sont des points qui sont soulignés dans le rapport "Eco-safe" 2004 de l'Université de Turku (Finlande).

- Le principe d'accélération rapide jusqu'à la vitesse escomptée pourrait être appliqué trop "littéralement", et déboucher sur une diminution des distances de sécurité dans le trafic, s'il n'est pas combiné avec une anticipation adéquate.
- Rapprochement excessif du véhicule qui précède dans un effort d'uniformisation optimale de la vitesse. S'il est mal géré, le maintien d'une vitesse constante peut se traduire par des marges de sécurité insuffisantes à cause d'une décélération trop tardive.
- L'application trop précoce du frein moteur peut engendrer une circulation différente de celle du "trafic normal" et accroître le risque de collision arrière.
- Le principe visant à "éviter les arrêts" peut être source de problèmes : s'il est appliqué à proximité des passages pour piétons ou de carrefours à visibilité réduite, "les capacités d'observation de l'apprenti-conducteur peuvent s'avérer insuffisantes".

Mis à part ces conflits potentiels qui sont certes évitables, le potentiel de gain apporté par l'éco-conduite semble significatif par rapport aux différentes mesures présentées précédemment. Pour aider le conducteur à mieux tirer profit de ce style de conduite, les systèmes d'assistance au conducteur peuvent être une alternative intéressante pour qu'il puisse se former à pratiquer des gestions au volant à des fins d'économie de carburant, d'amélioration de l'efficacité énergétique et de sécurité. Ces systèmes font donc l'objet du prochain paragraphe.

1.2 Systèmes d'aide à la conduite écologique

L'objectif des systèmes d'aide à la conduite écologique est de permettre au conducteur de maximiser son économie de carburant en le stimulant à adopter une conduite plus adaptée à son véhicule. Ces systèmes connaissent une évolution assez rapide et commencent à attirer plus d'attention dans le contexte où l'opinion publique se tourne plus que jamais vers le problème du réchauffement climatique dans le transport routier. Avec les avancées technologiques, le concept de ces systèmes devient de plus en plus complexe. L'objectif d'informer le conducteur qu'on a connu au début des années 1980 se voit compléter avec des objectifs de l'aider activement et de le former continuellement à devenir des conducteurs éco-responsable. Cette partie permet de voir ces différents concepts et les systèmes existant sur le marché ainsi que leur gain potentiel.

1.2.1 Concepts

Inform

Ce concept simple consiste à informer le conducteur de son style de conduite sous la forme d'indicateurs visuels. Les informations qu'on y retrouve souvent sont la consommation instantanée, la consommation moyenne, la distance parcourue et le temps de trajet. À titre d'exemple, les économètres et les ordinateurs de bords permettent de les afficher via un écran séparé. Plusieurs modèles existaient sur le marché dont la consommation était mesurée au moyen des jauges placées au niveau de l'admission du moteur ou des débitmètres. Cela implique qu'une intervention au niveau d'admission du moteur était nécessaire pour l'installation du système. Ils sont remplacés par une zone d'affichage sur le tableau de bord dont disposent nombre de voitures actuelles. Les informations affichées sont véhiculées par le bus CAN du véhicule. On voit apparaître dans cette zone selon le choix du conducteur, la consommation instantanée, la consommation moyenne en l/100 km,... Grâce à ces informations, le conducteur peut connaître les situations dans lesquelles survient le pic de consommation et à terme les éviter pour consommer moins. Mais ces systèmes se trouvent insuffisants pour aider les conducteurs à mieux connaître son véhicule et à adopter une conduite mieux adaptée au véhicule et au trajet.

Assister

Les systèmes discutés dans cette partie sont des systèmes actifs ou informatifs dont l'objectif premier est d'améliorer le confort et la sécurité du conducteur. Leur utilisation favorise tout de même une conduite plus douce et par conséquent l'économie de carburant dans certains cas. C'est pour cette raison qu'on les considère tout de même comme des alternatives possibles pour réduire la consommation de carburant.

Les premiers exemples sont des régulateurs de vitesses dont la nouvelle génération sont appelées régulateur de vitesse adaptatif (ACC pour Adaptive Cruise Control). Trois principaux objectifs de ces systèmes sont d'assurer que la vitesse souhaitée n'est pas dépassée, que la vitesse du véhicule est automatiquement adaptée au véhicule qui précède et finalement de décharger le conducteur dans certaines situations. Ils permettent ainsi à l'automobiliste de conduire de façon plus décontractée mais sans pour autant le déresponsabiliser. Concernant le facteur d'économie de carburant, l'argument utilisé consiste à dire que l'augmentation de la fluidité du trafic et une conduite plus souple, assurée par les systèmes ACC, permettent de réduire la consommation. Certaines études [VE03, BI01] dans le contexte du trafic avec des véhicules équipés du système ACC et des véhicules non équipés montrent une baisse de consommation grâce à ces systèmes. Mais dans certains cas, l'utilisation d'un tel système donne des résultats négatifs, notamment

avec le maintien d'une vitesse constante sur un parcours sinueux et avec des pentes. Le fait d'introduire l'aspect d'économie de carburant dans la conception de ces systèmes [LhHPH10] pourrait améliorer leur efficacité énergétique. C'est aussi le cas du système développé par E. Hellstrom [Hel10] qui sera explicité un peu plus loin.

Comme les systèmes ACC, les systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse ISA (Intelligent Speed Adaptation) [ESLR06, Ehr] n'ont pas été conçus dans le but de réduire la consommation. Il s'agit donc de systèmes qui permettent de récupérer la limitation locale de vitesse et utilisent cette information pour la répercuter au conducteur ou limiter la vitesse du véhicule. L'influence sur la consommation de carburant du véhicule qui en est équipé n'est prouvée qu'après différentes études [LCG⁺08, BBD⁺09, SPE08]. Le résultat le plus fréquemment cité est la conclusion d'une expérimentation de recherche qui a eu lieu en Angleterre et réalisée par l'Université de Leeds [CM00]. Avec l'hypothèse d'une pénétration complète du système ISA, [Car05] conclut à une réduction d'environ 8% de la consommation de carburant dans les zones urbaines et seulement 2% sur les autoroutes. D'autres études similaires [Min01] estiment aussi une réduction de la consommation de carburant de près de 11%. Il existe par ailleurs des études qui ne donnent pas la même conclusion. L'étude récemment réalisée par l'université de Monash en Australie [RTY⁺06] trouve seulement une réduction de consommation dans la zone de limitation de vitesse de 80 km/h et avec une combinaison du système ISA et du système d'alerte de distance de sécurité (FDW pour Following Distance Warning system).

À partir de ces deux exemples, on peut conclure que l'efficacité énergétique de ces systèmes reste encore un sujet en discussion. Il faut remarquer tout de même qu'ils augmentent certainement la sécurité et le confort du conducteur et que cela ajoute peut être un effet psychologique favorable à une conduite plus écologique.

Informé, Suggérer et Apprendre

Ce concept n'a été développé que ces dernières années. Il consiste à la fois à informer le conducteur sur sa conduite, lui suggérer des consignes à suivre pour réduire sa consommation et de lui inculquer à terme une conduite plus éco-responsable. Deux principaux axes de développement sont notamment envisagés. D'un côté, on a des systèmes d'aide à la conduite embarqués sur le véhicule (projet GERICO [BB06], tableau de bord éco-conduite de HONDA et de l'autre côté, des systèmes issus du concept MDD (pour Modern Drive Devices). La différence principale entre ces deux types de systèmes provient de la façon de fournir des conseils au conducteur. Les systèmes embarqués sont capables de délivrer des informations, des suggestions en temps réel et adaptés au trajet. Le concept MDD quant à lui met l'accent sur les analyses et les conseils donnés au conducteur une fois que le trajet est achevé grâce à des programmes informatiques d'analyse statistique. A ces conseils le conducteur peut avoir un meilleur comportement lors du prochain passage sur le trajet. La suite de ce paragraphe nous permet de discuter plus en détails ces systèmes.

Systèmes embarqués

Le principe des systèmes embarqués peut se résumer par la figure 1.8.

Ils se composent de trois parties : les capteurs, le module de calcul et l'interface graphique. La première comprend les différents capteurs (récepteur GPS, radar, carte d'acquisition du bus CAN...) pour acquérir des informations sur la route, sur le trajet, sur les consignes de sécurité et sur l'état du véhicule. À partir de ces informations, le module de calcul cherche des consignes en vitesse et de rapport de boîtes dites optimales en économie de carburant. Ces informations

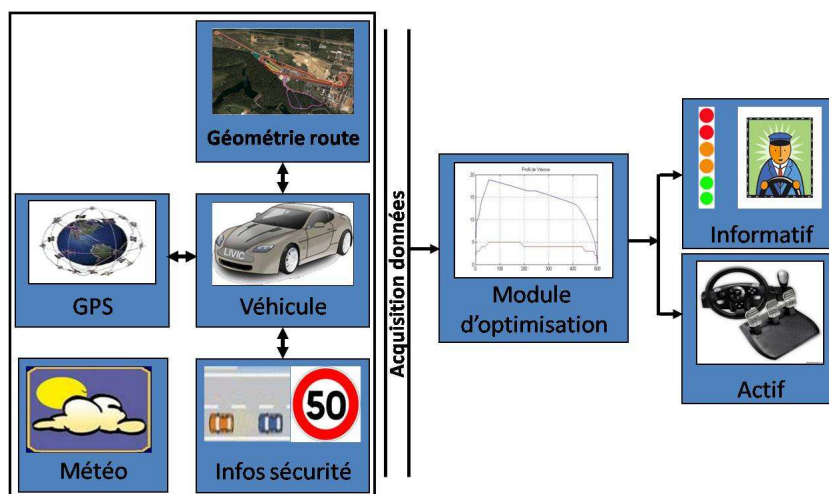


FIG. 1.8: Structure des systèmes d'aide à la conduite écologique embarqués

sont ensuite transférées au conducteur grâce à des interfaces graphiques dans le cas des systèmes suggestifs ou sont considérées comme des consignes d'entrée des systèmes de commande dans le cas des systèmes actifs.

Si les architectures globales de ces systèmes se ressemblent, les stratégies de réduction de consommation ainsi que la conception de l'interface sont différentes.

Dans [vdVDvM01], les auteurs proposent un prototype qui permet de réduire la consommation en carburant en se basant sur un concept s'appelant "modèle normatif". Ce modèle décrit les comportements optimaux du conducteur dans un large contexte connu sous le nom des états. Ils sont appelés par exemple l'état d'accélération, de freinage, ou de croisière, ... Le comportement du conducteur actuel est alors comparé au comportement optimal. Si un large écart est détecté, ce comportement va être signalé au conducteur. Les conseils donnés au conducteur sont déterminés par un planificateur qui inclut en même temps l'aspect sécuritaire. Le conseil va être annulé s'il provoque une situation d'insécurité pour le conducteur. Les paramètres utilisés pour ce système sont la vitesse du véhicule, le régime moteur, l'embrayage, le rapport de boîte, les positions des pédales, le couple de freinage, l'angle de braquage et le temps inter-véhiculaire.

Le principe de cette stratégie consiste à faire fonctionner le moteur dans sa zone de fonctionnement optimale. Pour cela, la cartographie du moteur qui relie la consommation spécifique du moteur, le régime et le couple moteur est utilisée. Les consignes en vitesse et de rapport de boîte à suivre sont données au conducteur via une Interface Homme-Machine. Elle est présentée dans la figure 1.9.

Elle est composée d'une échelle de six LEDs de couleur vert, jaune et rouge indiquant l'écart entre la conduite réalisée et la conduite optimale. Des messages courts sont aussi donnés si le conducteur doit changer le rapport de boîte. Le système a été testé sur un simulateur de conduite et un gain de carburant est démontré.

Les informations données dans [vdVDvM01] nous laissent tout de même perplexes. En effet, il manque les détails concernant la détermination des comportements optimaux. On a l'impression que le système se base sur un système de décision dont la référence est l'ensemble des conseils d'éco-conduite. Par conséquent, la cartographie du moteur ne semble pas indispensable. De plus, le gradient de la route, un des paramètres s'avérant important n'est pas pris en compte.

Une autre approche qui semble plus rigoureuse et qui donnerait des résultats encourageants

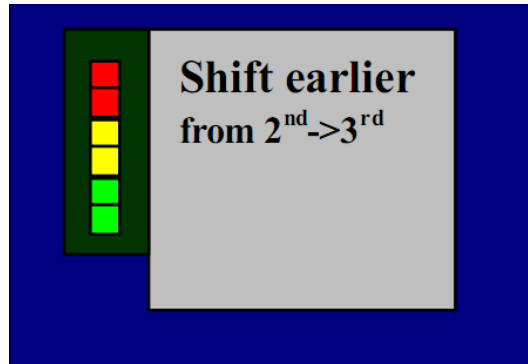


FIG. 1.9: Interface proposée dans [vdVDvM01]

consiste à comparer le profil du conducteur avec un profil dit optimal. Celui-ci est obtenu avec la formulation d'un problème de contrôle optimal. Cette stratégie va être discutée dans le chapitre 4. À ce stade, on se contente de citer les différents travaux ayant abordé ce type d'approche.

Schwarzkopf et Leipnik [SL77] semblent les premiers à essayer de mettre en place le problème de contrôle optimal. Ils calculent les trajectoires optimales pour une accélération, de la position d'arrêt à une vitesse de croisière donnée. Les polynômes quadratiques sont utilisés pour modéliser les performances du véhicule et le contrôle optimal est obtenu en utilisant le principe du maximum de Pontryagin. Hooker [Hoo83], [Hoo88] obtient des solutions numériques plus précises avec le simulateur de consommation de carburant et la programmation dynamique. Il calcule le contrôle optimal pour certaines situations de conduite. L'inconvénient de la méthode de Hooker est l'investissement à apporter pour faire des tests pour obtenir notamment le simulateur des performances du véhicule. Les études plus récentes [LBML08, LBML08, HFN05] appliquent cette approche dans différents contextes. On peut aussi citer les travaux de Scordia [SDrT⁺05]. L'objectif est de déterminer le point de fonctionnement optimal du moteur thermique en travaillant sur le couplage de ce dernier avec un moteur électrique dans une architecture hybride. Le problème d'optimisation formulé tient compte des différents paramètres du véhicule, du moteur thermique et du moteur électrique. Il est résolu numériquement par la programmation dynamique.

En résumé, les systèmes embarqués offrent une précision encourageante des consignes à donner au conducteur. Par contre, le développement et l'intégration de ces systèmes dans les véhicules actuels demandent encore beaucoup d'investissement et du temps. Dans les années à venir, avec des véhicules qui communiquent entre eux et des bases de données routières 3D (comme proposent le projet NEXTMap d'Intermap ou la société NAVTEQ) qui seront disponibles, ces systèmes peuvent apporter un plus dans l'argument de vente des constructeurs et peuvent être intégré dans de nouveaux modèles de véhicule.

Systèmes MDD

Contrairement aux systèmes embarqués, le concept MDD ne vise pas à donner des consignes précises en temps réel car le processus ne le permet pas. L'objectif de ce concept est de donner aux conducteurs les informations personnalisées sur son attitude au volant pour qu'il puisse l'améliorer.

La figure 1.10 résume ce concept.

Le système enregistre les données liées au véhicule le long du trajet. Certaines informations comme la consommation moyenne, la distance parcourue,... sont fournies au conducteur. À la



FIG. 1.10: Concept MDD

fin du trajet, les données enregistrées peuvent être transférées vers un ordinateur sur lequel un logiciel d'analyse est pré-installé. En travaillant sur les informations dynamiques du véhicule (accélération, vitesse, rapport de boîte, régime moteur,...), le programme fournit au conducteur des fiches de synthèse, des graphiques et des conseils sur sa conduite. Toutes ces informations deviennent donc des supports que les conducteurs peuvent utiliser pour se former à l'éco-conduite. Sans parler de l'efficacité de cette méthode, qui n'est pas reconnue à l'heure actuelle, ce concept demande aux utilisateurs une certaine capacité d'analyse, de synthèse et surtout de la patience. Les lacunes informatiques peuvent aussi écarter certaines catégories d'utilisateurs notamment les conducteurs âgés. C'est pour cela que ce type de système convient mieux à des moniteurs de conduite ou à des gestionnaires de flotte.

Que peut-on encore imaginer ?

En terme de conception architecturale, le fonctionnement d'un système d'assistance écologique au conducteur peut être décrit par le scénario suivant. Le conducteur après avoir attaché sa ceinture communique au système le point d'arrivée qu'il souhaite. Le système de navigation propose au conducteur un itinéraire le plus économique en carburant et en temps de trajet. Ensuite, le système va émettre des suggestions aux conducteurs tout au long du trajet pour adopter un profil de vitesse le plus adapté possible à la géométrie de la route, aux conditions du trafic et aux consignes de sécurité. À la fin du trajet, des synthèses peuvent être données au conducteur pour qu'il puisse encore améliorer son interaction avec les consignes données par le système. On voit dans ce scénario la complémentarité des différentes approches. On s'intéresse dans le cadre d'étude à la partie permettant de fournir au conducteur les consignes en temps réel.

1.2.2 Systèmes commercialisés

Comme on l'a souligné précédemment, le nombre de systèmes d'aide à la conduite écologique reste encore très limité sur le marché surtout celui concernant les systèmes embarqués. Il existe tout de même des intentions de les intégrer dans les voitures haut de gamme de la part de certains constructeurs et des produits du concept MDD qui sont proposés par certaines sociétés. Cette section nous permet de regarder des propositions sur le marché actuel.

Projet GERICO

Le projet GERICO (Gestion de l'Énergie par Interface CONducteur) est lancé depuis décembre 2003 avec le soutien de l'ADEME qui rassemble de nombreux partenaires dont Continental Automotive, la Ville de Toulouse, Eurisco International, INP de Toulouse... L'objectif du projet est de proposer un système donnant des informations au conducteur en vue de l'aider à réduire l'énergie et le carburant qu'il consomme.

Le système fonctionne au moyen d'un logiciel intégrant des données cartographiques régulièrement actualisées. Le conducteur reçoit sur son tableau de bord des conseils sur les vitesses à utiliser en fonction de la route empruntée ainsi que sur le rapport de boîte optimal en vue de réduire les consommations de carburant (figure 1.11).

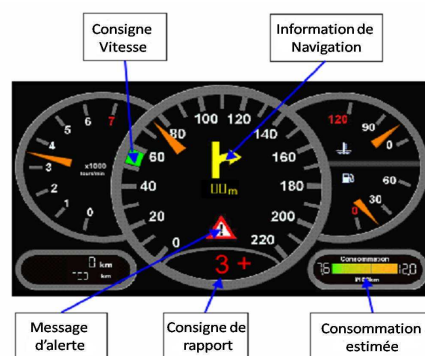


FIG. 1.11: Tableau de bord proposé dans le projet GERICO

Sur le tableau de bord, les informations suivantes sont affichées :

- la vitesse à pratiquer et le rapport à utiliser en fonction des attributs de la route et de la vitesse du véhicule
- la consommation de carburant prévue pour le trajet en cours
- les messages de prévention et d'alerte

Un dispositif de guidage par GPS peut être installé en complément, permettant alors à l'automobiliste d'être guidé dans son parcours (figure 1.12).

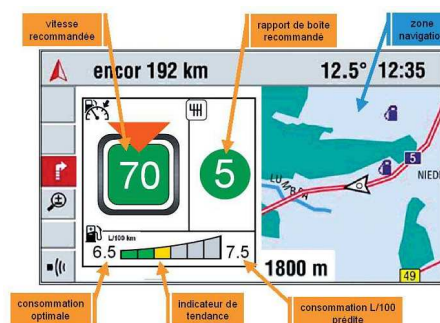


FIG. 1.12: Interface sur véhicule Astra

Une industrialisation de ce système a été envisagée pour l'horizon 2010 (source ADEME). Mais pour l'instant, ce système n'est toujours pas disponible sur le marché.

Système Eco AssistTM de HONDA

Dans la même famille de systèmes embarqués, le constructeur HONDA a annoncé courant 2008 que sa nouvelle série hybride Insight serait équipée d'un système d'aide à la conduite écologique baptisé Eco AssistTM. Ce système dispose de plusieurs fonctions. La première consiste à optimiser le contrôle des éléments du groupe motopropulseur (transmission continuellement variable (TCV), moteur et composants connexes) en activant le mode ECON. Dans le même temps, il ajuste le fonctionnement du climatiseur, augmente la possibilité d'engager plus tôt la fonction d'arrêt au ralenti et accroît la recharge de la batterie pendant le freinage. Le deuxième module permet de sensibiliser le conducteur à sa conduite instantanée. Sur le tableau de bord, la consommation de carburant instantanée est affichée en temps réel. De plus, le compteur de vitesse change de couleur en fonction de la conduite du conducteur : du vert pour une conduite économe au bleu pour une consommation excessive (figure 1.13).



FIG. 1.13: Système Eco AssistTM présenté par HONDA

Par ailleurs, un autre module donne une appréciation générale de la conduite du conducteur. Des informations sous forme graphique donnent au conducteur les économies de carburant qu'il a obtenues lors de ses trois derniers trajets. Le système de pointage permet de mesurer le progrès de la conduite au fur et à mesure en faisant pousser les graphiques ludiques sous forme de feuilles d'arbre. Ainsi le conducteur obtient une rétroaction de sa conduite à la fois instantanée et cumulative.

Ce système permet donc de faire de l'économie de carburant en agissant sur le véhicule mais en même temps sur la conduite du conducteur. Il utilise simultanément le concept des systèmes embarqués comme le système GERICO et le concept MDD. D'après les communiqués du constructeur, la série hybride Honda Insight équipée de ce système va être commercialisée prochainement.



FIG. 1.15: Interface du logiciel EcoDrive du constructeur FIAT

type de véhicule. Par conséquent, les paramètres de la voiture doivent être préalablement renseignés par l'utilisateur (données de la carte grise, puissance, motorisation, énergie,...) (figure 1.16). Le logiciel propose également à son utilisateur de suivre dans le temps ses performances en matière d'éco-conduite.



FIG. 1.16: Boitier EcoGyzer et Interface du logiciel proposé par la société Nomadic Solution

La version pour les nomades quand à elle permet au conducteur de visualiser certaines informations en temps réel comme la consommation, les messages de conseils...(figure 1.17).



FIG. 1.17: Version EcoGyzer pour les nomades

Dans une approche un peu différente, le logiciel EcoRoute compatible avec le système de

navigation GPS Garmin nüvi propose un itinéraire avec en plus des informations sur la consommation (figure 1.18). Cela permet au conducteur de faire un choix d'itinéraire tenant compte de l'aspect environnemental. Cette idée se retrouve dans les travaux présentés dans [ELBF06].



FIG. 1.18: Logiciel EcoRoute compatible avec les GPS Garmin Nüvi

Le logiciel présente des fonctionnalités comme le mode challenge qui permet au conducteur de comparer ses différentes conduites sur le même trajet en terme de consommation et d'émissions de CO_2 .

1.2.3 Gains en économie de carburant

Les systèmes d'aide à la conduite écologiques n'ont été que récemment introduits sur le marché. Aucune étude statique sur leurs gains en économie de carburant dans les conditions réelles n'est réalisée jusqu'à maintenant. Il est donc difficile de conclure sur l'efficacité de ces systèmes. Les gains potentiels sont notamment annoncés par les travaux de recherche cités précédemment.

L'évaluation du prototype proposé dans [vdVDvM01] sur des simulateurs montre qu'une baisse de la consommation totale de 16% est possible. Il est noté qu'un même conducteur ne peut réduire sa consommation que de 9% en suivant les consignes d'éco-conduite. Cela signifie d'après l'auteur que le système apporte une réduction supplémentaire de 7% à un conducteur écologique. Ainsi ce gain atteint 16% en condition de trafic urbain. Dans le cadre du projet GERICO, le système est implanté et testé sur un véhicule d'essai (Renault Mégane Scénic) dans les environs de Toulouse. L'analyse comparative des tests effectués a montré que le système d'assistance embarqué est plus efficace qu'une formation à la conduite économe, avec une réduction de 17% de la consommation de carburant contre une réduction de 11%. L'analyse approfondie des performances du système a montré que la réduction de la vitesse permet une plus grande réduction de la consommation en carburant à l'extérieur plutôt qu'à l'intérieur des villes et que la bonne sélection du rapport de boîte de vitesses a principalement des effets en ville.

Concernant les systèmes MDD, le gain apporté par ces systèmes n'est toujours pas connu. Si le constructeur FIAT prétend que son dispositif peut faire chuter la consommation de 15%, les avis des utilisateurs restent mitigés. On attend peut être une étude de plus grande envergure et indépendante quant à l'efficacité de ces systèmes. Il faut souligner tout de même que ces systèmes peuvent inciter les conducteurs à prendre conscience d'une conduite écologique.

1.3 Discussion sur la consommation des véhicules lourds

Jusqu'à maintenant, même si on ne distingue pas les différents types de véhicules dans le transport routier, l'accent a été mis sur le secteur automobile. Les véhicules lourds comprennent les poids lourds, les bus et les cars sont de gros consommateurs de carburant du secteur de transport routier. Cela est apparu dans le "Bilan de la circulation en 2008" du Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (figure 1.19).

2008	Parc moyen (1000 véhicules)	Parcours moyen (km/véhicule)	Circulation sur le territoire (Gvéh.km)	Consommation unitaire (L/100 km)	Consommation totale (1000 m3)	Livraisons de carburant (1000 m3)
Voitures particulières	30 775	12 798	393,9	6,8	26 865	
essence	14 438	9 354	135,0	7,6	10 283	
Diesel	16 338	15 842	258,8	6,4	16 582	
Véhicules utilitaires légers	5 711	16 103	92,0	9,4	8 622	
essence	790	7 911	6,2	8,9	557	
Diesel	4 921	17 418	85,7	9,4	8 066	
Véhicules lourds	638	45 808	29,2	34,8	10 153	
poids lourds	554	47 773	26,5	35,1	9 302	
bus et cars	84	32 768	2,7	31,1	851	
TOTAL VEHICULES USUELS	37 123	13 873	515,0	8,9	45 640	
Véhicules étrangers			27,7	15,8	4 367	
Véhicules divers (+ventes sous douane) (2)			9,7	4,6	2 238	
TOTAL GENERAL (1)			552,4	9,1	52 245	
Esence			165,0	7,5	12 779	11 988
Gazole			387,4	9,8	39 466	38 459
TOTAL GENERAL			552,4	9,1	52 245	50 447

FIG. 1.19: Bilan de la circulation des transports en France en 2008 [dledS]

En effet, si le nombre de véhicules lourds ne représente que 1.69% du parc français de véhicules, leur consommation totale représente jusqu'à 20.3% de la consommation du parc. Cela est expliqué par le fait que même si leur nombre n'est que de 630 000 véhicules parmi les 37 millions du parc, leur parcours moyen et leur consommation moyenne sont beaucoup plus élevés que ceux des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers. En effet, le parcours moyen d'un véhicule lourd est de 41 274 km, presque trois fois plus élevé que celui des voitures particulières (12 850 km) ou des véhicules utilitaires légers (VUL) (16 016 km). Leur consommation moyenne est de 35.1 l/100km, presque quatre fois plus élevée que celle des VUL (9.4 l/100km) et cinq fois plus élevée que celle des voitures particulières. Avec des caractéristiques qui sont propres aux véhicules lourds (masse, objectif d'utilisation, trajet emprunté,...), les différentes mesures et approches citées ci-dessus ont probablement des impacts différents par rapport aux autres types de véhicule.

Concernant les systèmes d'aide à la conduite, si on admet qu'un gain d'économie de carburant de 15% est possible, l'incitation financière pour adopter ces mesures ne serait pas pareil entre un conducteur de poids lourds et un automobiliste. Si on reprend les mêmes chiffres donnés ci-dessus et en supposant que le prix du gasoil est de 1.07€ le litre, l'économie en 2008 d'un conducteur de véhicule lourd est de 2317€ contre 140€ pour un particulier. Ce qui fait tout de même une énorme différence. De plus, les véhicules lourds sont plus souvent utilisés dans un but commercial, ce qui n'est pas le cas des voitures qui sont utilisées en même temps pour le loisir. Ce gain économique peut donc jouer un rôle encore plus important dans les décisions d'adoption des mesures écologiques. C'est aussi une des raisons pour lesquelles la pénétration des mesures réduisant la consommation dans le parc actuel est probablement plus facile dans le cas des véhicules lourds que dans les véhicules légers.

Pourtant, à notre connaissance, il existe actuellement peu de projets de recherche sur le développement de ces systèmes dans les véhicules lourds. On peut les comptabiliser au nombre

de deux.

Le premier est le projet PREDIT-ANR-ANGO [LBML08, LBM⁺08] dans le domaine du transport public. Dans ce projet, le trajet du bus est parfaitement connu car en site propre. Un ensemble de trajectoires optimales est calculé hors-ligne. Une stratégie a été ensuite mise en place pour utiliser ces trajectoires en temps réel en tenant compte notamment de l'approche du bus aux feux rouges et les arrêts aux stations. Ce système informatif communique avec le conducteur à travers une interface homme-machine qui comprend un écran et une échelle de diode. Les consignes de conduite optimale sont présentées au conducteur sous la forme d'une échelle verticale de neuf LED. Cette série de diodes de trois couleurs différentes (jaune, vert et rouge) permet au chauffeur de doser l'effet d'accélération qu'il doit fournir. En complément de ces consignes de conduite, un écran positionné latéralement par rapport au chauffeur, indiquera plusieurs valeurs présentant différents aspects de la consommation (consommation instantanée, moyenne et journalière) afin d'apporter au chauffeur une information plus explicite concernant l'incidence de l'application des consignes sur la consommation. Ce système combine donc le concept "Informer, Suggérer et Apprendre" qu'on a discuté précédemment. Des tests sont en cours pour étudier l'efficacité d'un tel système.

Le deuxième projet est celui relaté dans les travaux de E. Hellstrom [HFN05, Hel05, Hel10] cités auparavant. Il s'agit cette fois d'un système actif permettant d'assister le conducteur. L'objectif est de concevoir un régulateur de vitesse en tenant compte de l'aspect d'économie de carburant. Pour cela, la cartographie de la route est supposée disponible. La formulation d'un problème d'optimisation est utilisée avec comme variables de contrôle la position des pédales d'accélérateur et de freinage et le rapport de vitesse. La stratégie prédictive avec un horizon électronique permet d'ajouter l'aspect d'anticipation dans les consignes de commande. Le gain de consommation obtenu avec ce système sur les pistes d'essai est de 3.5% comparé à une utilisation d'un système ACC.

Ces deux travaux qui représentent les concepts "Assister" et "Informer, Suggérer et Apprendre" montrent le potentiel d'économie de carburant des systèmes d'aide à la conduite dans le contexte des véhicules lourds. Il est alors intéressant d'avoir maintenant une comparaison de l'efficacité des systèmes d'aide à la conduite appliqués aux véhicules légers. En terme de stratégie utilisée, on voit intervenir non seulement le véhicule mais aussi les données d'infrastructure. Ce point est nouveau. Ces systèmes peuvent être considérés comme représentatif d'une nouvelle génération de systèmes d'assistance écologique au conducteur .

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la problématique du réchauffement climatique liée au développement du transport routier est exposée. Une mise en situation est donnée avec par la suite la présentation des différentes mesures prises et envisagées pour réduire l'impact environnemental de ce secteur. L'automobiliste reste au centre de ces différentes mesures.

Les avancées technologiques permettent une réduction considérable d'émissions de CO_2 des véhicules. L'amélioration des infrastructures et la gestion plus efficace du trafic permettent de réduire le temps de trajet et les embouteillages. Quoi qu'il en soit, le bilan des émissions des gaz à effet de serre ne cesse d'augmenter. En effet, si les émissions unitaires des véhicules diminuent, le nombre de véhicules circulant sur la route continue à augmenter. De plus, les véhicules plus propres et moins gourmands en carburant dont le budget alloué diminue peut inciter des automobilistes à prendre plus souvent la voiture. Ceci augmentera le kilométrage moyen des véhicules et entraînera donc plus d'émissions de CO_2 . Les mêmes effets peuvent exister avec d'autres mesures.

Des infrastructures plus intelligentes permettent d'augmenter la fluidité du trafic, de diminuer le temps de trajet, d'éviter les bouchons et donc donnent plus de confort au conducteur. La question soulevée est alors : Est ce que ce confort et cette liberté retrouvés pourrait inciter les automobilistes qui ont abandonné leur véhicule pour les transports en commun à retourner à leurs habitudes d'automobilistes ? C'est pour tout cela que la sensibilisation des automobilistes sur la question écologique reste toujours une mesure à maintenir. Dans ce contexte, les systèmes d'aide à la conduite écologique peuvent avoir leur place dans le secteur automobile dans les années à venir.

Si l'efficacité énergétique des systèmes MDD et d'autres systèmes comme ISA ou ACC n'est pas très connue ou pas encore claire, celle des systèmes embarqués écologiques semble évidente. Mais pour une intégration dans les véhicules des années à venir, le système ne doit pas se contenter d'un seul objectif d'économie de carburant. En effet, avec toutes les technologies et informations qui seraient mises à disposition, le système doit en plus être capable d'améliorer le confort et surtout la sécurité des passagers. C'est dans cet esprit que sera conduite notre recherche dans le contexte des véhicules légers tout en gardant une extension possible vers des véhicules lourds.

Chapitre 2

Modélisation du véhicule et de la consommation

Sommaire

2.1	Modèle longitudinal du véhicule	29
2.1.1	Forces opposées au mouvement du véhicule	30
2.1.2	Force aux roues fournie par le moteur	32
2.1.3	Équation du mouvement longitudinal	35
2.1.4	Discussion sur le modèle utilisé	36
2.2	Modèle de consommation	37
2.2.1	Généralités	37
2.2.2	Quelques modèles existants	38
2.2.3	Développement d'un modèle de consommation à partir de données expérimentales [LNM09]	43

Ce chapitre présente la modélisation de la dynamique longitudinale et de la consommation en carburant du véhicule. Ces modèles permettent de prédire le mouvement longitudinal du véhicule et d'évaluer sa consommation durant le trajet. Il faut noter qu'il existe déjà des travaux sur ce thème. La tâche consiste alors à les adapter à notre besoin dans le cas du modèle dynamique longitudinal ou de proposer des nouveaux modèles plus adaptés dans le cas de la modélisation de la consommation. Dans cette démarche, nous allons proposer des alternatives pour contourner des absences d'information ou d'instrumentation que nous allons préciser tout au long de ce chapitre. L'ensemble des démarches de modélisation peut se résumer alors de façon suivante. L'équation du mouvement longitudinal est obtenue à partir des forces externes appliquées au véhicule et du système de transmission en appliquant les principes de base de la mécanique dont les détails sont présentés dans [KN00, Gil92]. La validité du modèle va être illustrée par des simulations. Ensuite, le modèle de la consommation de carburant est construit à partir de données expérimentales acquises avec des véhicules instrumentés. Le modèle utilisé est aussi validé sur deux types de véhicules légers différents.

2.1 Modèle longitudinal du véhicule

Pour obtenir le modèle longitudinal du véhicule, on utilise le principe fondamental de la Dynamique qui s'écrit :

$$M\vec{a} = \sum \vec{F} \quad (2.1)$$

avec \vec{a} l'accélération du véhicule et $\sum \vec{F}$ la somme des forces exercées sur le véhicule. On y distinguera \vec{F}_x la force tractrice disponible aux roues fournie par le moteur et \vec{F}_{ext} l'ensemble des forces extérieures.

On remarque que les principales forces résistantes sont la force aérodynamique \vec{F}_A , la force résistante au roulement \vec{F}_R et la force de gravité \vec{F}_G . Sur la figure 2.1, elles sont représentées par leurs normes notées respectivement F_A , F_R et F_G et par leur directions indiquées par le sens des flèches. Dans le cas d'une montée avec un angle de θ , toutes ces forces sont opposées au sens du mouvement du véhicule. La force tractrice \vec{F}_x est quant à elle dans le sens du trajet.

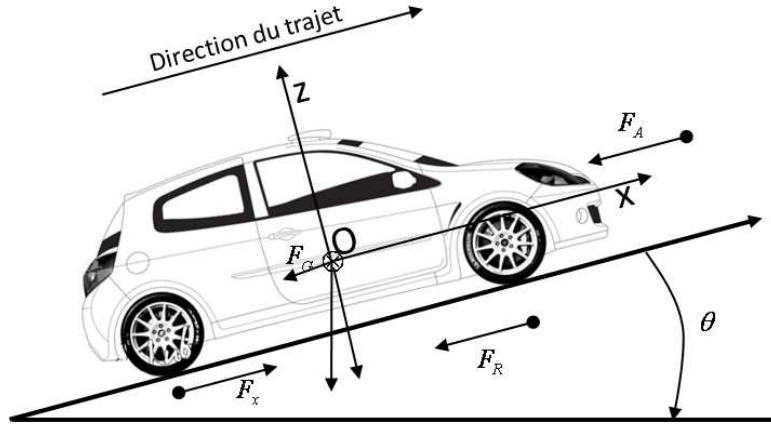


FIG. 2.1: Différentes forces résistantes longitudinales agissant sur le véhicule

Par la suite, les normes des vecteurs sont utilisées avec comme convention de signe suivante. Le signe "+" est utilisé pour les forces dans le sens du trajet et le signe "-" est pour celles opposées au mouvement du véhicule.

2.1.1 Forces opposées au mouvement du véhicule

Force aérodynamique

La force aérodynamique F_A est calculée par l'expression :

$$F_A = \frac{1}{2} \rho S C_x v_r^2 \quad (2.2)$$

avec ρ est la densité de l'air en kg/m^3 , S la surface frontale du véhicule en m^2 , C_x le coefficient de résistance aérodynamique, v_r la vitesse relative du véhicule au vent en m/s .

Cette force varie en fonction de l'allure du véhicule mais aussi des conditions météo et de l'altitude. Cette variation est très complexe et dépend de nombreux facteurs. Différents travaux [JK78, Big87, Ben89] permettent d'estimer par exemple l'influence de la température et de l'altitude sur la densité de l'air. Ainsi une relation entre la densité de l'air ρ en fonction de l'altitude ALT et de la température T_{air} est proposée dans [Ben89] sous la forme :

$$\rho = 0.0566 + 1.225(1 - 2.26 * 10^{-5} ALT)^{4.225} - 0.00377 T_{air} \quad (2.3)$$

ρ vaut alors par exemple $1.2 Kg/m^3$ à 200 m d'altitude avec une température de $15^\circ C$.

Le coefficient de résistance aérodynamique C_x dépend quant à lui de la vitesse relative du véhicule au vent v_r et de l'angle d'incidence du vent. Ces deux paramètres sont difficiles à mesurer

de façon précise et varient beaucoup lors d'un trajet. Pour cela, les auteurs [Big87, Gre03] ont proposé l'approche suivante : Tout d'abord, le coefficient de résistance aérodynamique nominal $C_{xnominal}$ est obtenu par des tests dans un tunnel avec un angle d'incidence du vent nul. Ensuite, pour retrouver un coefficient proche de celui qui peut être obtenu sur la route, le coefficient nominal est ajusté par un coefficient de multiplication moyen de l'ordre de 1.25 pour une vitesse moyenne du vent entre 3 et 5 m/s . En appliquant le même principe, cette approche calcule la vitesse relative du véhicule au vent v_r par la relation $v_r = 1.02v$, avec v la vitesse du véhicule.

Force résistante au roulement

La force résistante au roulement F_R s'écrit généralement sous la forme :

$$F_R = MgC_R \quad (2.4)$$

avec C_R le coefficient de résistance au roulement, M la masse du véhicule en kg et g l'accélération par gravité en m/s^2 .

Bien que l'équation (2.4) reste standard, le calcul du coefficient C_R est l'objet de plusieurs travaux. Cenek [Cen94] a trouvé que C_R dépendait de la vitesse du véhicule. La forme commune s'écrit :

$$C_R = C_o + C_v v^{C_m} \quad (2.5)$$

avec C_o le coefficient statique de la résistance au roulement, C_v le coefficient dynamique de la résistance au roulement en $1/(m/s)^{C_m}$ et C_m vaut 2 dans le cas des véhicules légers.

Watanatada [WHP⁺87] calcule le coefficient C_R pour les voitures en fonction de la rugosité de la route en utilisant l'équation (2.6) :

$$C_R = 0.0218 + 0.00061IRI \quad (2.6)$$

avec IRI la rugosité de la route en m/km .

Ces données seront intéressantes si on souhaite dans le futur affiner le modèle et qu'on a plus de possibilités d'obtenir les mesures précises de ces paramètres. Dans notre étude, une valeur moyenne de C_R sera utilisée car d'une côté, on ne dispose aucun moyen pour vérifier la validité de ces formules et de l'autre côté, les équations (2.5 et 2.6) dépendent des paramètres très variables suivant le trajet. Une valeur moyenne de C_R reste alors justifiée.

Force de gravité

La force de gravité est prise en compte dans le mode longitudinal lorsque le véhicule est sur une route non plane. Les ingénieurs, qui travaillent sur la conception d'une route définissent une pente comme une route qui descend et la rampe comme une route qui monte. Dans ce mémoire, la pente est utilisée comme un terme générique pour ces deux cas. La décomposition de cette force sur la direction du trajet donne la relation suivante :

$$F_G = Mg \sin(\theta) \quad (2.7)$$

avec θ la pente de la route.

Comme θ demeure faible, la relation $\theta \simeq \sin(\theta) \simeq \tan(\theta)$ est vérifiée avec une erreur de seulement de 1.03% dans le cas d'une pente de 10 deg. D'ailleurs, on utilise le plus souvent la formule $\tan(\theta) = GR/100$ où GR est le gradient de la route en pourcentage. L'équation (2.7) s'écrit alors :

$$F_G = MgGR10^{-2} \quad (2.8)$$

Nous détaillons par la suite la force aux roues fournie par le moteur via le système de transmission.

2.1.2 Force aux roues fournie par le moteur

Les différents composants de la transmission sont décrits par la figure 2.2

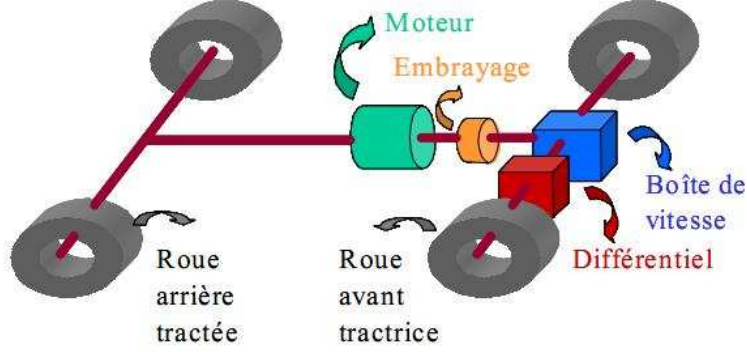


FIG. 2.2: Système de transmission

Moteur

Le moteur utilisé est un moteur essence à combustion interne. La modélisation du moteur thermique d'un véhicule léger est présentée dans [Nou02]. Néanmoins, l'identification des différents paramètres du modèle pour un autre modèle est extrêmement difficile et demande beaucoup d'effort et d'équipements. C'est pour cette raison qu'une cartographie du moteur est utilisée dans les simulations. Cette cartographie est utile pour la validation de notre approche, mais il subsiste des problèmes qui seront signalés par la suite.

La cartographie relie le couple moteur T_e délivré à la sortie du moteur à la position de la pédale d'accélérateur α_t et au régime moteur ω_e . Ce couple s'écrit alors :

$$T_e = f(\omega_e, \alpha_t) \quad (2.9)$$

Cette relation est représentée sur la figure 2.3.

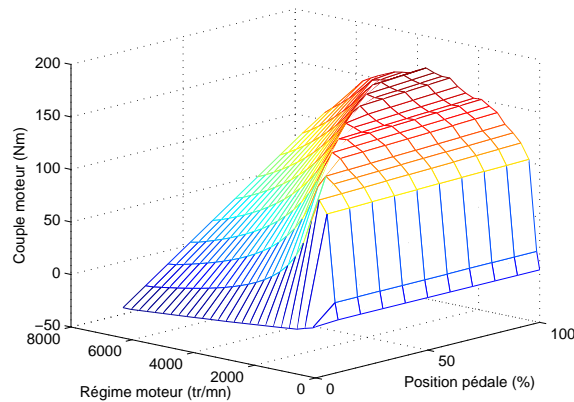


FIG. 2.3: Cartographie du moteur du véhicule Renault Laguna

Le couple maximal peut être approximé par un polynôme d'ordre deux sous la forme de l'équation (2.10).

$$T_{eub} = \alpha_1 + \alpha_2 \omega_e + \alpha_3 \omega_e^2 \quad (2.10)$$

Cette contrainte va être prise en compte lors de la formulation du problème d'optimisation.

L'utilisation de la cartographie permet d'avoir des simulations proches des conditions réelles et aboutit donc une meilleure validation de la méthodologie. Un problème se pose alors pour la phase d'expérimentation. En effet, la cartographie à notre disposition est celle d'un véhicule Renault Laguna alors que le véhicule à notre disposition au LIVIC et sur lequel les tests seront effectués est une Renault Clio Eco2. Les moteurs de ces véhicules possèdent évidemment des caractéristiques très différentes. La comparaison entre le couple maximal du moteur Renault Laguna et celui de la Renault Clio Eco2 en est un exemple.

La figure 2.4 montre le couple maximal que peut fournir le moteur de la Renault Laguna. De ce tracé, il apparaît que l'approximation de ce couple par l'équation (2.10) est justifiée.

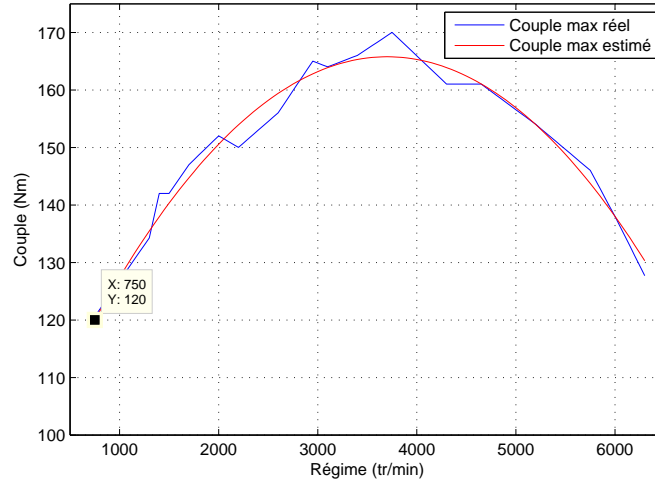


FIG. 2.4: Approximation du couple moteur maximal de la Renault Laguna

Par contre, cette approximation n'est pas forcément valide si on regarde le couple maximal du moteur TCE 100 du véhicule Renault Eco2 visible sur la figure 2.5

On voit par exemple que le couple moteur maximal de la Renault Eco2 est atteint dans un intervalle de régime moteur plus large comparativement à celui de la Renault Laguna. Cet exemple montre qu'on ne peut pas utiliser la même cartographie pour les deux véhicules. Dans la suite de notre étude, d'un côté, les paramètres du véhicule Renault Laguna seront utilisés pour les simulations mais de l'autre côté, des alternatives vont être proposées dans la perspective de la phase de validation expérimentale comme par exemple la conception de la stratégie d'optimisation du rapport de la boîte de vitesse ou la construction du modèle de consommation en carburant.

Transmission

Le couple moteur T_e à la sortie de l'arbre moteur est délivré à l'entrée de la boîte de vitesse via l'embrayage. En considérant I_e , l'inertie en rotation du moteur et $\dot{\omega}_e$, l'accélération angulaire du moteur et que l'embrayage est sur la position verrouillée, le couple T_c à la sortie de l'embrayage

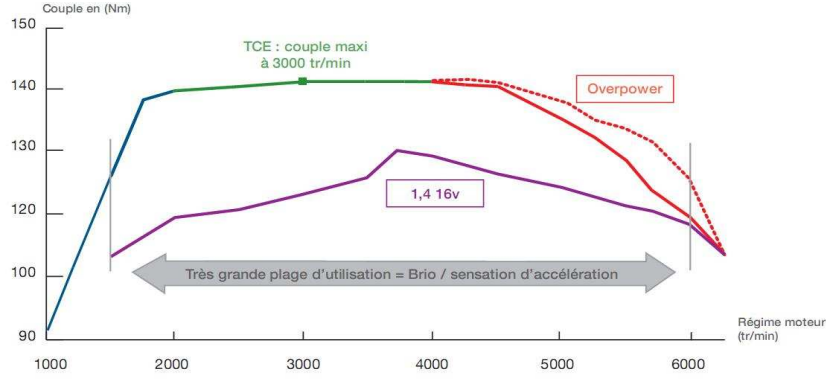


FIG. 2.5: Approximation du couple moteur maximal de la Renault Eco2

s'écrit :

$$T_c = T_e - I_e \dot{\omega}_e \quad (2.11)$$

A la sortie de la boîte de vitesse, le couple à l'entrée se retrouve amplifié par le rapport de boîte mais subit des pertes dues à l'inertie de la boîte. Le couple s'écrit alors :

$$T_d = (T_c - I_t \dot{\omega}_e) N_t \quad (2.12)$$

avec N_t la valeur du rapport de transmission de la boîte, I_t l'inertie rotationnelle de la transmission.

De même, le couple délivré à l'essieu T_a , pour faire tourner les roues et fournissant la force tractrice au sol, est amplifié par le différentiel avec des pertes dues à l'inertie de l'arbre de transmission :

$$T_a = (T_d - I_d \dot{\omega}_d) N_f \quad (2.13)$$

avec I_d , l'inertie en rotation de l'arbre de transmission, $\dot{\omega}_d$ l'accélération angulaire de l'arbre de transmission et N_f le rapport de réduction du différentiel.

En combinant les équations précédentes, le couple fourni à l'essieu par le moteur à travers la transmission est donné par :

$$T_a = ((T_e - (I_e + I_t) \dot{\omega}_e) N_t - I_d \dot{\omega}_d) N_f \quad (2.14)$$

Le rendement global de la transmission est proportionnel au produit du rendement des différents éléments de la transmission. Il dépend très fortement de la valeur du couple moteur. Il suffit alors de multiplier la valeur du rendement au terme contenant le couple moteur. Cela donne l'équation (2.15)

$$T_a = ((\eta T_e - (I_e + I_t) \dot{\omega}_e) N_t - I_d \dot{\omega}_d) N_f \quad (2.15)$$

Si on tient compte du couple de freinage, le couple réel T'_a fourni aux essieux s'écrit :

$$T'_a = r F_x + I_w \dot{\omega}_w = T_a - T_b \quad (2.16)$$

avec F_x force tractive au sol, r le rayon des roues et I_w l'inertie rotationnelle des roues.

Par ailleurs, les accélérations angulaires du moteur, de la transmission et des roues sont liées par les rapports de boîte par les relations $\dot{\omega}_d = N_f \dot{\omega}_w$ et $\dot{\omega}_e = N_t \dot{\omega}_d = N_t N_f \dot{\omega}_w$. L'équation (2.16) devient alors :

$$r F_x + I_w \dot{\omega}_w = \eta T_e N_t N_f - \{(I_e + I_t) N_f^2 N_t^2 + I_d N_f^2\} \dot{\omega}_w - T_b \quad (2.17)$$

Finalement, la force tractrice aux roues peut s'écrire sous la forme

$$F_x = \frac{1}{r} \{ \eta N_f N_t T_e - ((I_e + I_t) N_f^2 N_t^2 + I_d N_f^2 + I_w) \dot{\omega}_w - T_b \} \quad (2.18)$$

La force de traction dépend donc de T_e, T_b, r, N_i et I_i .

2.1.3 Équation du mouvement longitudinal

En connaissant la force tractrice et les forces s'opposant au mouvement du véhicule, par application du principe de Newton, on obtient l'équation du mouvement du véhicule :

$$M \dot{v} = F_x - F_R - F_A - F_G \quad (2.19)$$

Pour les forces longitudinales, la notion de glissement est illustrée par le rapport λ . Le glissement longitudinal diffère selon que le véhicule est en phase de freinage ou en phase d'accélération et s'écrit :

$$\begin{aligned} \lambda = \frac{r\omega_w - v}{r\omega_w} &\geq 0 \quad \text{en accélération} \\ \lambda = \frac{r\omega_w - v}{v} &< 0 \quad \text{en freinage} \end{aligned} \quad (2.20)$$

En supposant l'absence de glissement longitudinal, les équations (2.20) nous permettent d'écrire $v = r\omega_w$, où ω_w (rad/s) est la vitesse angulaire de la roue ou encore $\dot{v} = r\dot{\omega}_w$. En substituant cette dernière relation dans (2.18) et en combinant avec les équations (2.2, 2.4, 2.7) des forces résistantes longitudinales, on obtient :

$$\begin{aligned} M \dot{v} &= \frac{\eta N_f N_t T_e}{r} - \{ (I_e + I_t) N_f^2 N_t^2 + I_d N_f^2 + I_w \} \frac{\dot{v}}{r^2} \\ &\quad - Mg C_R - 0.5 \rho S C_x v^2 - M g \sin \theta \end{aligned} \quad (2.21)$$

ou encore

$$\left(M + \frac{(I_e + I_t) N_f^2 N_t^2 + I_d N_f^2 + I_w}{r^2} \right) \dot{v} = \frac{\eta N_f N_t T_e}{r} - \frac{T_b}{r} - Mg C_R - 0.5 \rho S C_x v^2 - M g \sin \theta \quad (2.22)$$

On appelle la quantité $M_r = \frac{(I_e + I_t) N_f^2 N_t^2 + I_d N_f^2 + I_w}{r^2}$ la masse équivalent des composants en rotation. La quantité $M + M_r$ s'appelle la masse effective et le rapport $\frac{M + M_r}{M}$ est le facteur de masse qui dépend du rapport de boîte engagé.

Finalement on a :

$$\dot{v} = \frac{r}{M r^2 + I_{et} N_f^2 N_t^2 + I_{dw}} * (\eta N_f N_t T_e - T_b - r(Mg C_R + 0.5 \rho S C_x v^2 + M g \sin \theta)) \quad (2.23)$$

avec $I_{dw} = I_d N_f^2 + I_w$ et $I_{et} = I_e + I_t$.

La modélisation longitudinale du véhicule est donc décrite par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} &= v_x \\ \dot{v}_x &= \frac{r}{M r^2 + I_{et} N_f^2 N_t^2 + I_{dw}} * (\eta N_f N_t T_e - T_b - r(Mg C_R + 0.5 \rho S C_x v^2 + M g \sin \theta)) \end{cases} \quad (2.24)$$

2.1.4 Discussion sur le modèle utilisé

Le modèle donné par l'équation (2.24) est relativement simple. Les hypothèses qui sont implicitement ou explicitement posées sont :

- la structure du véhicule est rigide et symétrique
- le glissement existant entre les roues et la chaussée est négligé
- le convertisseur de couple ou l'embrayage est considéré comme verrouillé
- le changement de rapport de boîte est instantané
- le point mort n'est pas considéré

L'avantage d'un tel modèle est qu'il est facile à manipuler pour les calculs liés à l'optimisation qui vont être exposés dans les prochains chapitres. L'identification des paramètres du modèle requiert des moyens d'essai spécifiques qui ne sont pas disponibles au LIVIC. Ce travail sera réalisé dans un laboratoire partenaire équipé d'un banc à rouleaux. Actuellement, les données utilisées pour la simulation sont donc identifiées à partir des diverses informations obtenues dans la littérature. Cela ne nous empêche pas de prouver une certaine cohérence du modèle avec quelques tests qui consistent à comparer les résultats de simulation avec les données enregistrées. Pour cette comparaison, le jeu de données correspondant au véhicule Renault Laguna présenté dans l'annexe est utilisé. Le schéma simulink est celui de la figure 2.6.

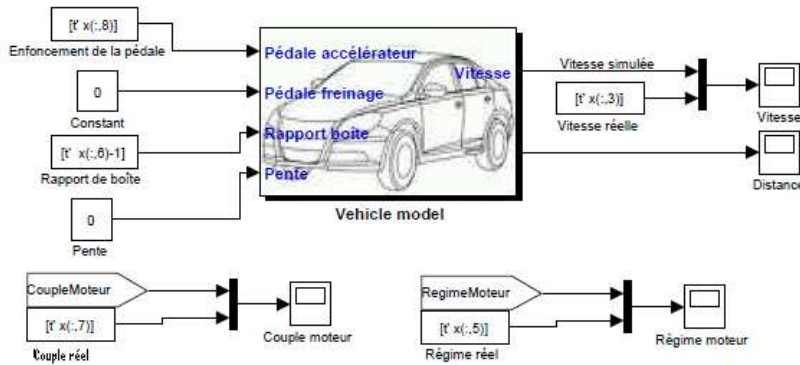


FIG. 2.6: Implantation du modèle sous Matlab/Simulink

Les entrées du modèle sont la position de la pédale d'accélération, le rapport de boîte, la pente et le couple de freinage. Les deux premiers paramètres sont présentés sur les figures 2.7a et 2.7b. La pente et le couple de freinage ne sont pas connus et fixés à zéro.

Les figures 2.8a, 2.8b, 2.8c présentent respectivement les valeurs simulées et réelles du régime moteur, du couple moteur et de la vitesse du véhicule.

On remarque que les données issues de la simulation suivent relativement bien les variations des données réelles. L'ordre de grandeur des paramètres n'est pas du tout aberrant. On ne peut donc pas mieux prouver la cohérence du modèle en comparant les données de simulation et les données réelles car d'une part, le modèle utilisé est un modèle très simplifié et d'autre part, on ne connaît pas tous les paramètres pour reconstruire les conditions de conduite réelle pendant l'enregistrement.

Finalement, même si le modèle est simple, il représente assez bien les différents éléments pouvant influencer la consommation de carburant et la dynamique longitudinale du véhicule. C'est pour cela que ce modèle sera utilisé dans la suite de notre travail.

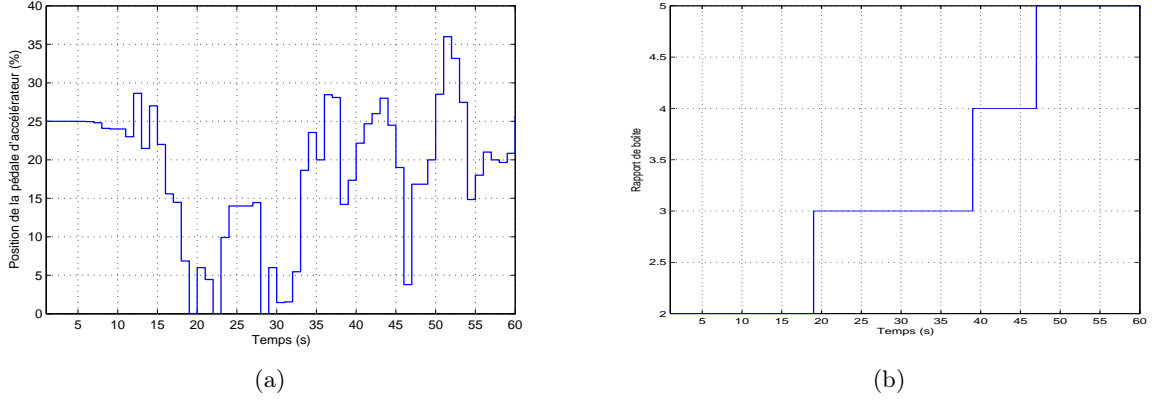


FIG. 2.7: Données enregistrées

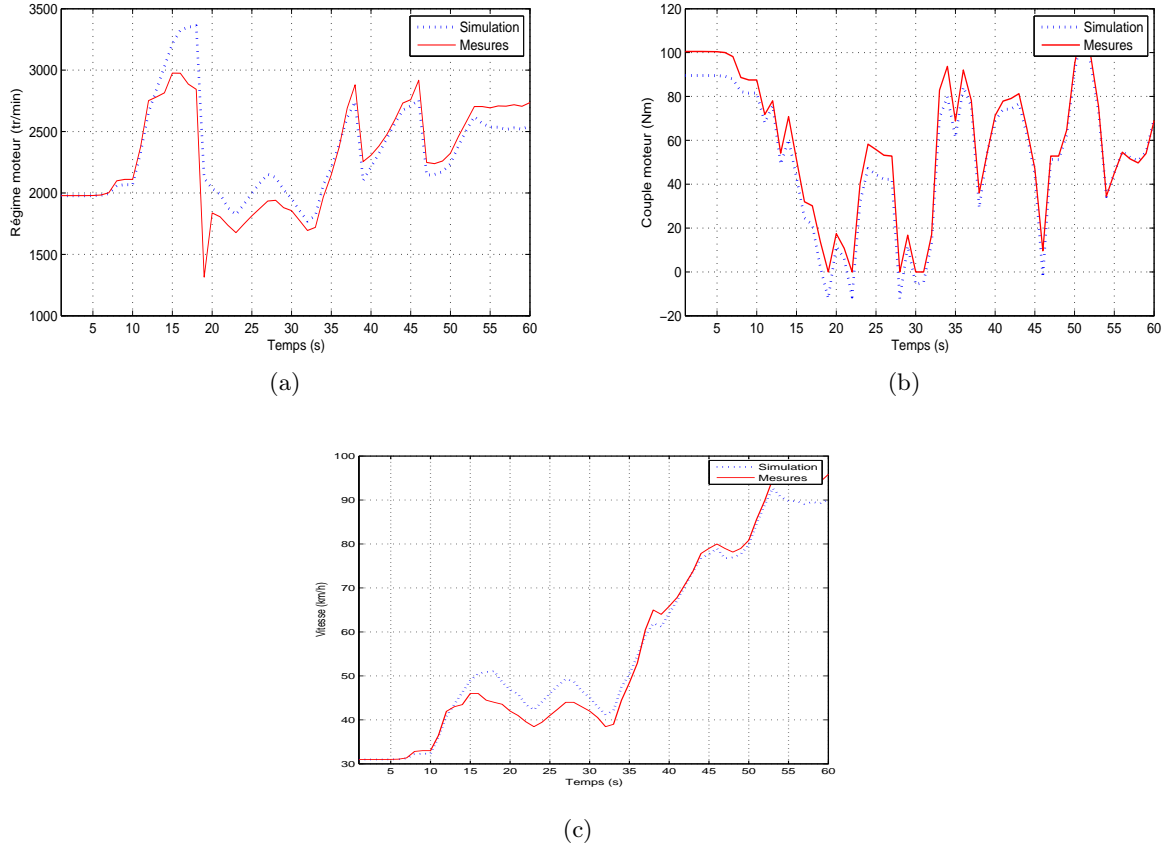


FIG. 2.8: Comparaison de la réponse du modèle aux données réelles

2.2 Modèle de consommation

2.2.1 Généralités

La modélisation de la consommation en carburant et des émissions des véhicules est un vaste sujet qui peut et doit être traité sur des échelles différentes. Il est évident que les modèles

utilisés pour évaluer la consommation sur un réseau routier large ne doivent pas avoir la même complexité et requérir la même précision qu'une évaluation locale sur un rond-point ou sur un réseau moindre et encore moins sur un seul véhicule à un instant précis. On peut donc distinguer trois types d'approches qui produisent des modèles de consommation macroscopique, mésoscopique et microscopique. Il est important de souligner qu'un bon modèle macroscopique n'a pas forcément la bonne précision pour être appliqué à une échelle plus locale, notamment à l'échelle d'un véhicule. On s'intéressera seulement aux modèles microscopiques qui modélisent la consommation du véhicule. Nous ne cherchons pas non plus à obtenir un modèle très générique valable pour tous les types de modèles du véhicule car cela est en dehors du cadre de notre travail. On se contentera donc de construire un modèle qui représente de façon acceptable la consommation de deux types de véhicules qui sont la Renault Laguna II et la Renault Clio eo2.

L'objectif de cette partie est alors double. D'une part, on présente le modèle de consommation de carburant utilisé et sa démarche de développement. D'autre part, on présente les différents modèles existants pour un éventuel travail de développement dans le futur notamment pour d'autres types de véhicules ou pour l'évaluation de l'impact environnemental des systèmes d'aide à la conduite. Dans cette perspective, une éventuelle extension sera alors discutée à la fin de cette partie.

Pour cela, quelques modèles macroscopiques et mésoscopiques sont passés en revue dans un premier temps. Ensuite, un état de l'art plus conséquent sur les modèles microscopiques à l'échelle du véhicule est présenté. Après différents tests des modèles alimentés par les données disponibles, il nous sera nécessaire de développer un modèle plus précis pour pouvoir l'utiliser dans un système d'aide à la conduite.

2.2.2 Quelques modèles existants

Évaluation de la consommation du trafic

Les différents modèles macroscopiques et mésoscopiques trouvés dans la littérature, se fondent essentiellement sur la vitesse moyenne du trafic. Ils conviennent pour l'évaluation de la consommation totale de carburant sur un réseau de trafic urbain qui permet de donner des consignes sur la vitesse moyenne à pratiquer. Par la suite, on notera fc , la consommation de carburant, sa signification et son unité pouvant être différentes en fonction des modèles : fc sera donc redéfinie à chaque modèle.

L'ensemble des travaux de [CH81, CEHW76, EHL76, EH78, Lam85] donne une estimation de la consommation par unité de distance fc en milieu urbain en fonction de la vitesse moyenne.

$$fc = k_1 + k_2 \bar{v} = k_1 + \frac{k_2}{\bar{v}} \quad (2.25)$$

avec \bar{v} la vitesse moyenne, k_1 et k_2 les paramètres du modèle.

Dans le même esprit, Watson [WMM80] propose un autre modèle qui prend en compte une variable supplémentaire appelée PKE pour l'énergie cinétique positive (Positive Kinetic Energy en anglais) :

$$fc = k_1 + k_2/\bar{v} + k_3\bar{v} + k_4PKE \quad (2.26)$$

avec fc la consommation de carburant en l/km , \bar{v} la vitesse moyenne, k_i les paramètres du modèle, PKE la somme de l'énergie cinétique positive pendant l'accélération en m/s^2 .

Le terme PKE est calculé par l'équation (2.27) :

$$PKE = \sum (v_f^2 - v_i^2) / (12.960 x_s) \quad (2.27)$$

avec v_i, v_f , respectivement les vitesses initiale et finale de la phase d'accélération en (km/h) et x_s , la longueur de la section.

Pour élargir la plage de vitesses valides de ces modèles, Vincent [VMR80] et Post [PTP⁺81, PKTC85] proposent des modèles qui utilisent comme variable la vitesse de croisière pour une circulation sur autoroute :

$$fc = a_1 + a_2 v_c + a_3 v_c^2 \quad (2.28)$$

$$fc = b_1 + b_2/v_c + b_3 v_c^2 \quad (2.29)$$

avec fc la consommation en ml/km , à la vitesse de croisière v_c (en km/h) et a_i, b_i , les paramètres du modèle.

D'autres auteurs comme [Akc81, AB83, RA83, SPA10b] proposent des modèles qui ne prennent pas en compte que la vitesse moyenne et la vitesse de croisière. Dans [Akc81], le modèle consiste à estimer séparément la consommation pendant les trois phases du cycle de conduite urbaine que sont la phase en croisière, la phase au ralenti et la phase de décélération ou accélération.

$$fc = f_1 X_s + f_2 t_s + f_3 h \quad (2.30)$$

avec fc la consommation moyenne par section de route (en ml), X_s , la distance totale de la section (en km), t_s le temps d'arrêt moyen par véhicule (en s), h le nombre d'arrêts moyen par véhicule, f_1 , la consommation pendant la phase de croisière (en ml/km), f_2 la consommation pendant la phase de ralenti (en ml/sec), f_3 la surconsommation par arrêt du véhicule (en ml).

G. Saint-Pierre [SPA10b] modélise la consommation sur un trajet en utilisant entre autres le temps à l'arrêt et le PKE. Le modèle s'écrit :

$$fc = a_1 + a_2 TP + a_3 ST + a_4 EBT + a_5 PKE + a_6 BS \quad (2.31)$$

avec fc , la consommation moyenne par section de route (en ml), TP , la position moyenne de la pédale d'accélérateur, ST , le temps d'arrêt moyen (en s), EBT , le temps d'utilisation du frein moteur moyen, PKE , le changement de l'énergie cinétique positive, BS le nombre d'utilisation de la pédale de frein.

Le modèle est construit suite à une expérience menée sur la ville de Versailles Satory avec le véhicule Renault Clio Eco2. Le coefficient de régression R^2 est utilisé pour mesurer la qualité de l'ajustement de l'équation de régression et peut donner une idée globale de l'ajustement. En cas de régression simple, un coefficient R^2 proche de 1 est suffisant pour dire que l'estimation par le modèle est bonne. Le coefficient R^2 de ce modèle est de 0.9344.

Le modèle développé par An et Ros [AR93] calcule la consommation du véhicule en fonction des caractéristiques du véhicule et du trajet telles que la vitesse moyenne, la vitesse instantanée, le nombre d'arrêts, la résistance au roulement. La forme de ce modèle est présentée par l'équation (2.32).

$$fc = [\alpha_{f.pwr}(1 - t_c - t_D)(\frac{v_{gear}}{v}) + \alpha_{f.idle}(\frac{t_c + t_D}{v})] + (\alpha_{tire} + \alpha_{air}\lambda v_r^2 + \alpha_{brake}\beta v_p^2 n + \frac{\alpha_{acc}}{v}) \quad (2.32)$$

fc	consommation par unité de distance
\bar{v}	vitesse moyenne sur le parcours
v_r	vitesse moyenne de croisière
v_p	pic de vitesse moyenne
n	nombre d'arrêts par mile
λ	moyenne de la vitesse au cube divisé par le cube de la moyenne de la vitesse
β	fraction de l'énergie cinétique absorbée par le freinage
t_c, t_D	fraction du temps de freinage et d'arrêt
$\alpha_{f.pwr}, \alpha_{f.idle}$	frottement du moteur en pleine puissance et au ralenti
α_{tire}	coefficient lié à la résistance au roulement des pneus
α_{air}	coefficient lié à la résistance aérodynamique
α_{brake}	coefficient lié au freinage
α_{acc}	coefficient lié à l'utilisation des accessoires du véhicule

Les modèles présentés sont utilisés pour une évaluation de la consommation du trafic dans différents lieux. Il nous est difficile de pouvoir donner un jugement sur la validité et la précision de ces modèles. Il est tout de même important de souligner que certains modèles sont intégrés dans des logiciels de simulation de trafic comme notamment le modèle (2.30) dans le simulateur TRANSYT-7F [WCR⁺84].

Évaluation de la consommation d'un véhicule

Les modèles microscopiques à l'échelle du véhicule consistent à estimer la consommation instantanée en carburant du véhicule à partir des valeurs instantanées des différents paramètres liés au véhicule lui-même ou aux conditions d'exploitation. Ils font l'objet de plusieurs travaux de recherche ces dernières années [ARA⁺02, PKTC85]. Il existe d'ores et déjà dans la littérature deux approches. La première utilise les données expérimentales pour construire des modèles empiriques. La seconde, plus récente, dite "mécanique", utilise les connaissances physiques et mécaniques du véhicule dans son mouvement ainsi que des facteurs liés à l'environnement pour en déduire le modèle de consommation.

On peut noter que même en utilisant des approches différentes, les modèles proposés par les auteurs ont tout de même des points de convergence au niveau des paramètres utilisés.

Approche empirique

Dans cette approche, on distingue d'un côté, les modèles ne faisant intervenir que des paramètres liés au véhicule comme la puissance, la vitesse, l'accélération et de l'autre côté, les modèles faisant intervenir en plus des caractéristiques de la route, du trajet comme la pente, le nombre d'arrêts...

Le premier modèle microscopique est dû à K. Post [PKTC85]. La consommation instantanée est donnée en fonction de la puissance appliquée par l'équation (2.33) :

$$\begin{aligned} fc &= \alpha + \beta P & P > 0 \\ &= \alpha & P \leq 0 \end{aligned} \tag{2.33}$$

avec fc la consommation instantanée en carburant en ml/s , α la consommation au ralenti en ml/s , β le facteur de l'efficacité moyenne en $mL/kW/s$ et P la puissance totale instantanée en kW .

Le laboratoire ARRB (Australian Road Research Board) [Akc89] a par la suite proposé une extension du modèle de Post. Le modèle de l'équation (2.34) prédit la consommation pour différents profils de vitesse du véhicule, en utilisant des coefficients moyens.

$$fc = \alpha + \beta_c P_c + \beta_a P_a \quad (2.34)$$

avec β_c, β_a , les paramètres d'efficacité, P_a la puissance totale d'avancement à vitesse constante, P_c la puissance totale due aux effets d'inertie.

Ensuite, on voit apparaître des modèles qui font intervenir la vitesse et l'accélération. Le modèle proposé par [AB83] s'écrit :

$$fc = k_1 + k_2 v + k_3 v^3 + k_4 a v + k_5 a^2 v \quad (2.35)$$

avec fc , la consommation instantanée en ml/sec , v la vitesse instantanée, a l'accélération instantanée en $(km/h/sec)$ et k_i les paramètres du modèle.

De la même manière, Ahn [Ahn98] et Rakha [RAAT99] ont développé un ensemble de modèles polynômiaux basés sur la vitesse et l'accélération instantanées. La forme générale du modèle est donnée par l'équation (2.36). La transformation logarithmique permet d'exclure tous les arguments négatifs liés à la consommation :

$$\ln(fc) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (k_{ij} * v^i * a^j) \quad (2.36)$$

avec fc la consommation en carburant en l/s , k , le coefficient de régression du modèle, v la vitesse instantanée du véhicule en m/s et a l'accélération instantanée du véhicule en m/s^2 .

Ce modèle a été mis au point à partir de données issues des huit véhicules et camions légers fournies par le laboratoire ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Les données, enregistrées sur route et sur banc d'essais, incluent une vitesse variant de 0 à 120 km/h avec un pas d'incrément de 1.1 km/h , l'accélération variant quant à elle entre $-1.5 m/s^2$ et $3.2 m/s^2$ avec un pas d'incrément de 0.3 m/s^2 .

En distinguant le cas de l'accélération et de la décélération, un nouveau modèle [ARA⁺02] donné par l'équation (2.37) a été proposé :

$$\ln(fc) = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (L_{ij} * v^i * a^j) & a \geq 0 \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (M_{ij} * v^i * a^j) & a < 0 \end{cases} \quad (2.37)$$

Il faut souligner que plusieurs modèles polynômiaux de la consommation en carburant ont été proposés dans [Ahn98]. Un modèle non linéaire utilisant des réseaux de neurones y est aussi présenté.

Chesher et Harrison [CH87] ont présenté un modèle qui prend en compte en plus des paramètres du véhicule, la géométrie de la route :

$$fc = a_0 + \frac{a_1}{s} + a_2 v^2 + a_3 RISE + a_4 FALL + a_5 IRI \quad (2.38)$$

avec fc , la consommation en carburant en $l/1000km$, v , la vitesse du véhicule en km/h , IRI , l'indice international de la rugosité, en m/km (ou mm/m), $RISE, FALL$, la pente de la route, a_0, \dots, a_5 des constantes.

Approche mécanique

L'approche mécanique qui a comme point de départ le modèle de Post présenté par l'équation (2.33), considère que la consommation est proportionnelle à la puissance totale demandée. Le travail consiste alors à trouver cette puissance. On commence par estimer et modéliser les différentes forces résistantes pour en déduire la force de traction nécessaire à l'avancement du véhicule. Par la suite, la puissance totale est calculée par la combinaison de ces forces avec la consommation des accessoires du véhicule (ventilateur de refroidissement, climatiseur, ...) et le frottement interne du moteur.

Dans cette approche, on retrouve les modèles développés par Greenwood [Gre03], Bennett [Ben89] et Bester [Bes81].

La démarche de cette approche est présentée sur la figure 2.9.

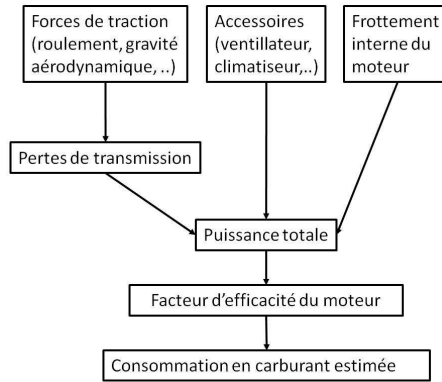


FIG. 2.9: Approche ARFCOM pour la modélisation de la consommation [Big88]

La relation entre la consommation et la puissance s'écrit de façon assez similaire au modèle (2.33)

$$\begin{aligned} fc &= \max(\alpha + \zeta P_{tot}) & P > 0 \\ &= \min fc & P \leq 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

avec fc la consommation de carburant en ml/s , α , la consommation au ralenti en ml/s , ζ , le facteur d'efficacité de la conversion carburant-puissance en $ml/kW/s$, P_{tot} , la puissance demandée, $\min fc$, le minimum de la consommation dans le cas d'une puissance négative.

L'ambiguïté demeure dans la façon de déterminer la consommation de carburant au ralenti. [BAB] exprime la relation entre la consommation au ralenti α et la cylindrée D du moteur par l'équation (2.40) :

$$\alpha = 0.220D - 0.0193D^2 \quad (2.40)$$

[Gre03] donne une relation directe entre la consommation au ralenti et le régime moteur qui est la suivante :

$$\alpha = a_0 + a_1\omega_e + a_2\omega_e^2 \quad (2.41)$$

En explicitant la prédiction de la puissance totale demandée à partir des équations présentées dans la partie "Modélisation du véhicule", le modèle d'estimation de la consommation de carburant avec l'approche mécanique s'écrit [Bes81] :

$$fc = a_0 + \frac{a_1}{v} + a_2v^2 + a_3GR + a_4a \quad (2.42)$$

avec a , l'accélération en m/s^2 .

Ce modèle a la même forme que celle utilisée dans l'approche empirique. La différence réside dans la définition des paramètres. Bester [Bes81] relie les coefficients avec des forces résistantes. En effet, a_0 est lié à la résistance au roulement, a_1 à la consommation au ralenti, a_2 à la résistance aérodynamique, a_3 à la résistance due à la gravité et a_4 à l'accélération.

Dans le même principe, le modèle EMIT [CCN⁺02] s'écrit sous la forme :

$$f_c = \begin{cases} \alpha + \beta v + \gamma v^2 + \delta v^3 + \zeta av & P_{tract} > 0 \\ \alpha' & P_{tract} = 0 \end{cases} \quad (2.43)$$

Cette approche est plus générique, comparée à l'approche empirique, dans le sens où les principes de base de la physique sont les mêmes pour différents types de véhicule.

Conclusion

Finalement, même si les deux approches sont différentes, on remarque que les modèles proposés par les auteurs ont beaucoup de points communs. Ce sont notamment les variables utilisées (la vitesse, l'accélération, le gradient de la route) et la forme (somme des produits de la vitesse et de l'accélération). Même si l'approche mécanique permet d'avoir une signification des coefficients liés aux paramètres, ces relations ne sont malheureusement pas définies de façon beaucoup plus claire en comparaison avec l'approche empirique.

Le principal inconvénient de l'approche empirique est qu'elle dépend beaucoup des caractéristiques du véhicule étudié. Si on veut généraliser le modèle pour un ensemble de véhicules, on introduit des paramètres moyens et en même temps une imprécision de l'estimation. Par contre, cette approche est parfois plus directe et plus facile si on dispose déjà de données expérimentales. L'approche mécanique, quant à elle, donne des modèles plus simples et plus génériques. Mais il faut estimer les différentes forces résistantes et identifier les paramètres. Cette étape demande d'avoir à disposition beaucoup d'instruments de mesure est donc peu évidente et parfois coûteuse à réaliser.

2.2.3 Développement d'un modèle de consommation à partir de données expérimentales [LNM09]

Dans la section précédente, plusieurs modèles de la consommation en carburant ont été présentés. L'objectif de cette étape est de trouver un modèle qui représente au mieux la consommation de carburant d'un véhicule léger. Ce modèle va être utilisé par la suite pour évaluer la consommation en carburant selon différents critères d'optimisation qui seront présentés.

Cette phase de développement s'est effectuée en deux étapes. Dans un premier temps, le développement du modèle est réalisé à l'aide des données expérimentales issues du projet LAVIA [ESLR06]. C'est un projet français qui a été soutenu par la Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière (DSCR) et par la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) du Ministère des Transports français afin de mieux apprécier les effets d'une généralisation des régulateurs de vitesse adaptatifs en termes d'acceptabilité par le conducteur et les effets sur les comportements de conduite. Suite à ce projet, l'impact environnemental de ces systèmes a été évalué au sein du LIVIC [SPE08]. La deuxième phase de développement consiste à tester les différents modèles avec les données mesurées par un débitmètre et fournies par le bus CAN de la Renault Clio Eco2. Le découpage est fait suivant la disponibilité des données sur un intervalle d'un an. Cela ne nous a pas permis de consacrer plus de temps pour le développement des modèles de consommation. On a dû se contenter de valider les modèles

précédemment développés avec ces nouvelles données. L'annexe détaille les différents aspects des données provenant de ces deux sources.

Pour évaluer la performance des modèles, on prend un critère simple qui consiste à accepter un modèle si l'erreur maximale entre la consommation réelle et la consommation estimée est inférieure à 7% et que la tendance des deux courbes est similaire. Ce dernier critère peut se traduire par un pourcentage élevé des erreurs inférieures à 7% et une erreur moyenne faible. Dans la mesure du possible, le modèle doit être simple et facile à évaluer.

Dans un premier temps, on va évaluer les différents modèles présentés ci-dessus avec les données à notre disposition. On présentera ensuite le développement de notre modèle.

Évaluation de certains modèles

On peut constater que la plupart des modèles présentés sont linéaires en les paramètres à identifier. On utilise alors la méthode des moindres carrés pour identifier ces derniers. Une description de cette méthode est donnée en annexe.

Pour le modèle de Post, la puissance est obtenue par le produit du couple moteur et du régime moteur $P = \omega_e T_e$. Ce modèle est testé sur un trajet dont la vitesse varie entre 0 et 115 km/h.

Les figures 2.10a et 2.10b présentent l'estimation de la consommation instantanée de carburant de la Renault Laguna par le modèle de Post. Ces figures montrent des résultats intéressants à développer par la suite. L'erreur maximale du modèle est de 12.9% et l'erreur moyenne est de 2.38%.

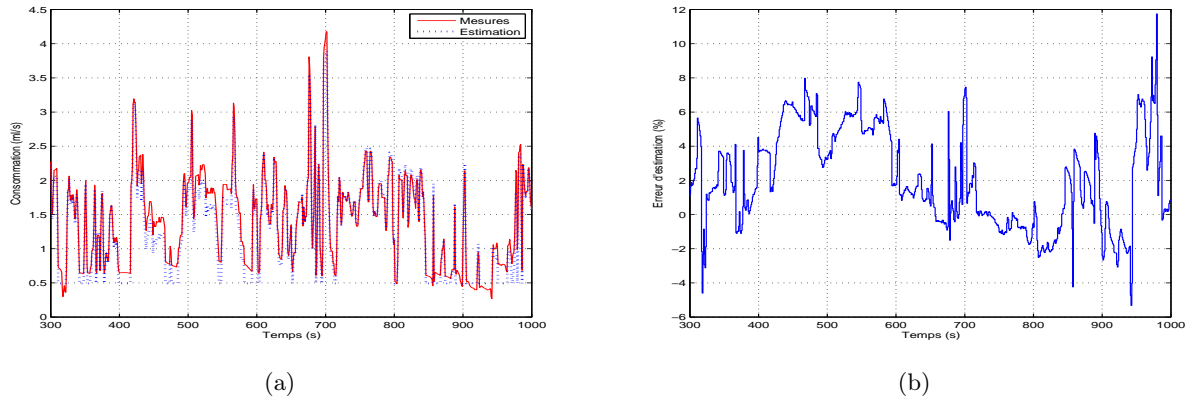


FIG. 2.10: Estimation avec le modèle K. Post

Le même test avec le modèle EMIT et celui de Ahn et Rakha n'ont pas donné de meilleures estimations. Les figures 2.11a et 2.11b montrent le résultat obtenu avec le modèle EMIT.

Sur ces figures, on voit bien que l'erreur maximale et l'erreur moyenne sont très grandes. La performance du modèle reste alors très limitée.

Parmi ces trois modèles, celui de Post donne la meilleure estimation pour les jeux de données utilisés. Les deux autres modèles donnent des erreurs d'estimation maximales trop importantes de l'ordre de 80% pour le modèle EMIT et de 50% pour le modèle de Ahn et Rakha. Il est important de souligner que les modèles testés ont été construits avec certaines hypothèses qui ne sont pas forcément vérifiées avec les données LAVIA (par exemple : route plane pour le modèle EMIT). Il est dans ce cas délicat de conclure quant à l'origine des erreurs d'estimation.

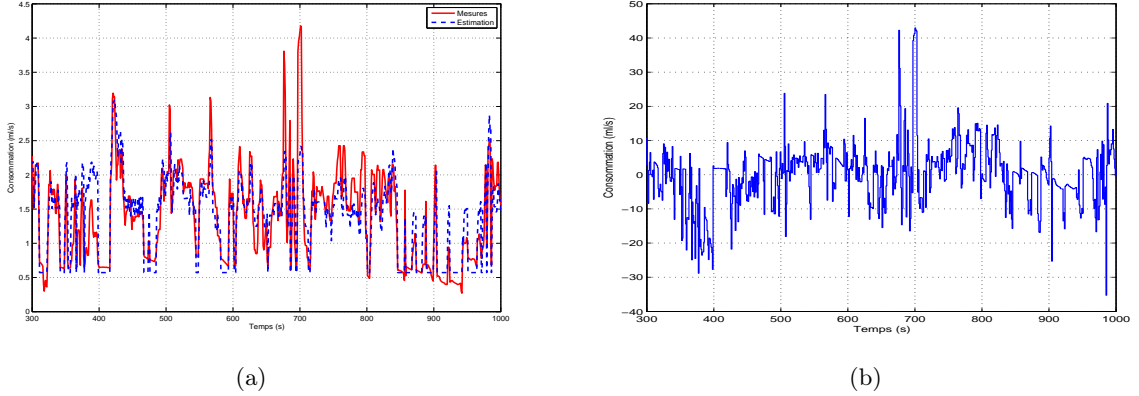


FIG. 2.11: Estimation avec le modèle EMIT

Par contre, on peut retenir que l'utilisation de la puissance moteur semble prometteuse et qu'on doit estimer séparément la consommation au ralenti et en fonctionnement normal. Il est par ailleurs évident que l'utilisation d'une simple constante pour le régime de ralenti est insuffisante. Finalement, l'utilisation seule de la cinétique du véhicule peut aussi être insuffisante. Il faut donc rajouter d'autres paramètres comme ceux de la route ou du trajet. On construit donc un nouveau modèle sous la forme :

$$\begin{aligned} fc &= \beta \quad \text{si } P > 0 \\ &= \alpha \quad \text{si } P \leq 0 \end{aligned} \quad (2.44)$$

où α et β sont fonction des différents paramètres du véhicule et du trajet, avec $P = \omega_e T_e$ et $\omega_e > 0$, on se ramène alors à tester la condition sur le couple moteur T_e à la place de la puissance P . D'autre part, la consommation au ralenti varie en fonction du régime moteur du véhicule. L'étude de Bowyer donne cette dépendance sous la forme de l'équation (2.41). Dans un premier temps, le modèle s'écrit :

$$\begin{aligned} fc &= \beta \quad \text{si } T_e > 0 \\ &= \alpha + \gamma\omega_e + \theta\omega_e^2 \quad \text{si } T_e \leq 0 \end{aligned} \quad (2.45)$$

Modèles proposés

À partir de données expérimentales à haute vitesse, la consommation peut être considérée comme une fonction linéaire de T_e . En utilisant la vitesse dans le modèle, on obtient l'équation (2.46) :

$$\begin{aligned} fc &= \beta_1 + \beta_2 v + \beta_3 T_e \quad \text{si } T_e > 0 \\ &= \alpha + \gamma\omega_e + \theta\omega_e^2 \quad \text{si } T_e \leq 0 \end{aligned} \quad (2.46)$$

Les figures 2.12a et 2.12b montrent le résultat de l'estimation avec le modèle (2.46), plutôt précis surtout pour le régime au ralenti. Différents tests ont été réalisés. C'est avec l'équation (2.40) que l'on estime la consommation en carburant au ralenti. L'identification avec les moindres carrés nous donne le tableau 2.1 des valeurs des coefficients et la performance du modèle. Pour une meilleure lisibilité, dans ce tableau, ainsi que tous ceux qui suivent, les valeurs des paramètres ont été multipliées par un facteur 10^{-4} :

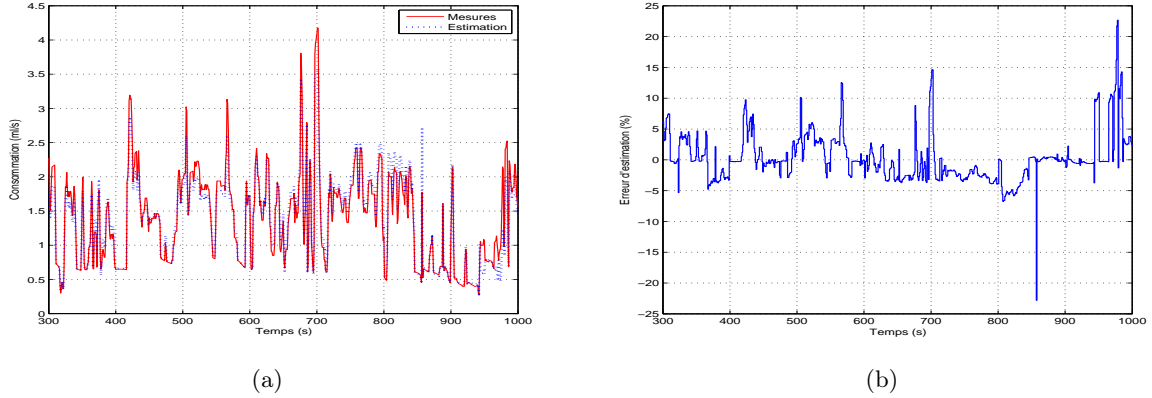


FIG. 2.12: Estimation avec le modèle (2.46)

TAB. 2.1: Résultats pour le modèle (2.46)

ϵ	$\frac{\text{mean}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{ \epsilon_{fc} }{\text{max}(fc)} < 7\%$
$\epsilon(\%)$	2.47	22.8	93.58
β_1	β_2	β_3	
-492.34603	45.09856	91.17993	
α	γ	θ	
1099.15704	0.03971	0.00026	

Ces résultats ne semblent pas encore très satisfaisants, on ajoute alors d'autres paramètres influençant la consommation, notamment l'accélération. Cela donne un deuxième modèle avec l'équation (2.47) :

$$\begin{aligned}
 fc &= \beta_1 + \beta_2 v + \beta_3 T_e + \beta_4 a & \text{si } T_e > 0 \\
 &= \alpha + \gamma \omega_e + \theta \omega_e^2 & \text{si } T_e \leq 0
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

L'estimation est très peu améliorée. Par contre, si le modèle est utilisé uniquement sur un parcours à vitesse élevée, on obtient un résultat de bonne qualité comme le montre la figure 2.13.

Sur le trajet retenu, il faut remarquer qu'il y a peu de changements de rapports de boîte de vitesse, qui influencent pourtant considérablement la consommation. Cela explique le fait que le modèle ne fonctionne pas correctement dans une zone de vitesses moyennes ou faibles où l'on a souvent des changements de rapport de boîte. En suivant cette réflexion, il faut souligner que sur le même rapport de boîte de vitesse, on a un rapport constant entre la vitesse et le régime moteur. D'où l'idée de remplacer la vitesse dans les équations précédentes par le régime moteur. Ce qui nous permet de construire d'autres modèles dans la section suivante.

Prise en compte du régime moteur

On suppose donc que l'influence du rapport de boîte sur la consommation peut s'exprimer à travers le régime moteur. On remplace la vitesse par le régime moteur dans le modèle (2.46),

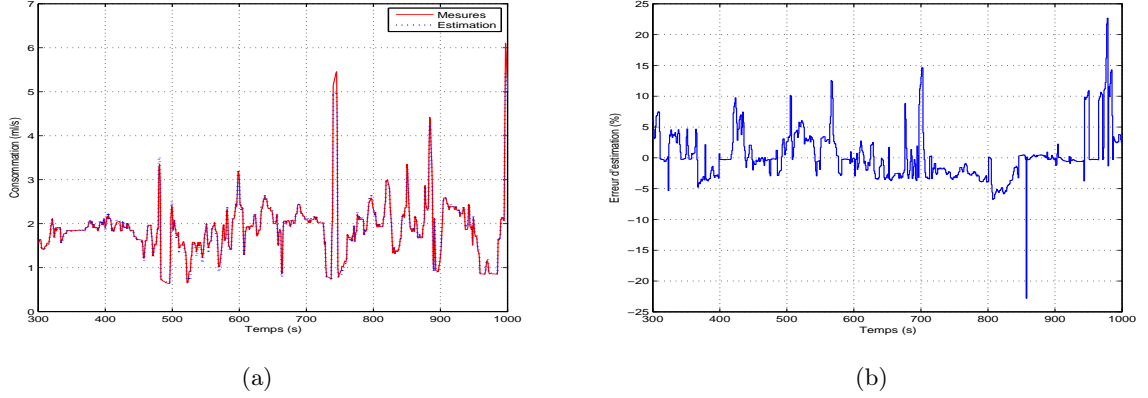


FIG. 2.13: Modèle (2.47) avec vitesse élevée

cela nous donne l'équation (2.48) :

$$\begin{aligned} fc &= \beta_1 + \beta_2 \omega_e + \beta_3 T_e & \text{si } T_e > 0 \\ &= \alpha + \gamma \omega_e + \theta \omega_e^2 & \text{si } T_e \leq 0 \end{aligned} \quad (2.48)$$

Ce modèle donne un résultat bien meilleur comme on peut le vérifier sur les figures 2.14 ainsi que dans le tableau des performances du modèle.

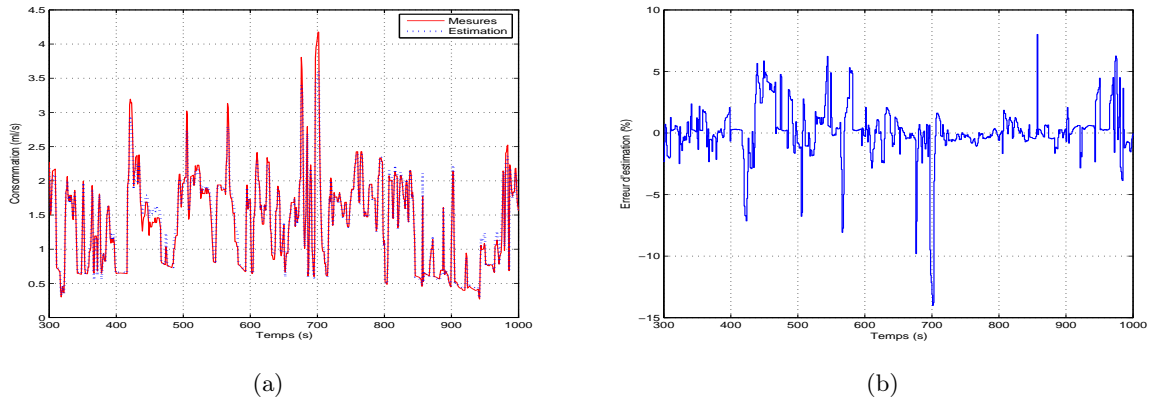


FIG. 2.14: Estimation avec le modèle (2.48)

Les erreurs maximale et moyenne sont plus faibles (14% et 1% au lieu de 22.8% et 2.47%) et le pourcentage d'erreurs inférieures à 7% est de 96% au lieu de 87%.

Ce modèle assez simple estime plutôt bien la consommation en carburant sur les différents trajets étudiés. Par contre, ces résultats ne sont pas encore satisfaisants car l'erreur maximale reste élevée. On souhaite améliorer le modèle en remplaçant le couple moteur par le produit du couple et du régime moteur, donc la puissance.

Modèle utilisant la puissance

TAB. 2.2: Résultats pour le modèle (2.48)

ϵ	$\frac{\text{mean}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{ \epsilon_{fc} }{\text{max}(fc)} < 7\%$
$\epsilon(\%)$	1.06	14.08	98.49
β_1	β_2	β_3	
-5353.57313	3.17790	94.91884	
α	γ	θ	
1099.15704	0.03971	0.00026	

Le modèle proposé dans cette section est proche de celui de l'équation (2.48). On y remplace T_e par le produit $\omega_e T_e$. Cela donne :

$$\begin{aligned} fc &= \beta_1 + \beta_2 \omega_e + \beta_3 \omega_e T_e & \text{si } T_e > 0 \\ &= \alpha + \gamma \omega_e + \theta \omega_e^2 & \text{si } T_e \leq 0 \end{aligned} \quad (2.49)$$

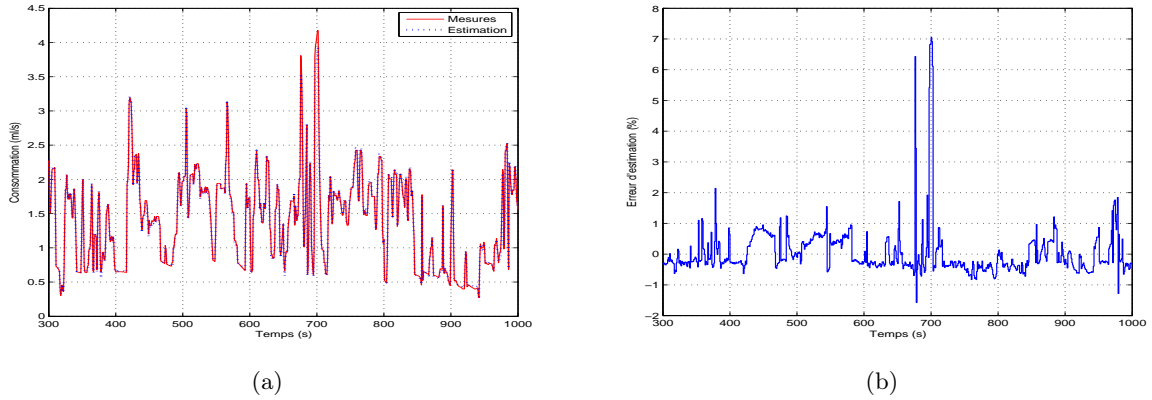


FIG. 2.15: Estimation avec le modèle (2.49)

Ce modèle reprend, pour le premier terme, l'idée développée par Post en utilisant la puissance du moteur. Les différents tests montrent qu'on améliore beaucoup l'estimation avec ce nouveau modèle. Sur la figure 2.15a, les deux courbes de consommation réelle et estimée se suivent bien. Il existe quelques pics de consommation que le modèle n'arrive pas à bien estimer. Les résultats sont quand même globalement corrects comme le montre la figure 2.15b. Les différents paramètres du modèle sont donnés dans le tableau 2.3 :

Le modèle de base est donné par l'équation (2.49). La présence des pics mal estimés représente le problème majeur. Le premier réflexe consisterait à introduire des paramètres supplémentaires dans le modèle. Mais quels paramètres faudrait-il ajouter sachant que l'on a déjà le régime moteur et la puissance ? D'après les précédentes remarques, on voit que l'ajout de l'accélération améliore de très peu le modèle et que la vitesse a moins d'influence sur la consommation que le régime moteur. Les tests réalisés avec ces deux paramètres nous confirment ces remarques. On retient

TAB. 2.3: Résultats de l'estimation avec le modèle (2.49)

$\frac{mean(\epsilon_{fc})}{max(fc)}$	$\frac{max(\epsilon_{fc})}{max(fc)}$	$\frac{ \epsilon_{fc} }{max(fc)} < 7\%$
0.42	12.018	99.78
β_1	β_2	β_3
-397.51019	1.16184	0.03954
α	γ	θ
1099.15704	0.03971	0.00026

donc le couple moteur comme variable supplémentaire. Le nouveau modèle est donc :

$$\begin{aligned} fc &= \beta_1 + \beta_2 \omega_e + \beta_3 \omega_e T_e + \beta_4 T_e & \text{si } T_e > 0 \\ &= \alpha + \gamma \omega_e + \theta \omega_e^2 & \text{si } T_e \leq 0 \end{aligned} \quad (2.50)$$

Ce modèle donne un résultat légèrement meilleur par rapport au modèle précédent. Le tableau récapitulatif 2.4 ainsi que les figures 2.16a, 2.16b nous permettent de constater cette différence.

TAB. 2.4: Résultats pour le modèle (2.50)

ϵ	$\frac{mean(\epsilon_{fc})}{max(fc)}$	$\frac{max(\epsilon_{fc})}{max(fc)}$	$\frac{ \epsilon_{fc} }{max(fc)} < 7\%$
$\epsilon(\%)$	0.398	9.35	99.40
β_1	β_2	β_3	β_4
-1029.92481	1.41071	0.03475	11.86631
α	γ	θ	
1086.27350	0.05276	0.00025	

Finalement, le modèle présenté par l'équation (2.50) ne satisfait pas tout à fait le critère que l'on a fixé mais il améliore nettement la précision de l'estimation de la consommation en carburant par rapport aux autres modèles trouvés dans la littérature. Il reste maintenant à savoir si la performance de ce modèle est toujours acceptable avec les données de la Renault Clio Eco2.

Validation du modèle avec les données du Renault Clio Eco2

Le modèle (2.50) est utilisé pour estimer la consommation instantanée de carburant du véhicule Renault Clio Eco2. Plusieurs essais avec le véhicule en question nous permettent d'avoir une base de données représentative de diverses conditions de conduite. L'étape d'identification des paramètres du modèle nous permet d'obtenir les valeurs représentées dans le tableau 2.5.

On vérifie à présent la performance du modèle sur deux trajets avec des profils de vitesses très différents comme le montrent les figures 2.17a, 2.17b

Le premier trajet est un trajet du milieu urbain d'une vingtaine de kilomètres réalisé dans les Yvelines. L'estimation de la consommation en carburant avec le modèle (2.50) et les coefficients du tableau 2.5 est présentée sur les figures 2.18a et 2.18b.

On voit que les résultats d'estimation restent alors acceptables sur l'ensemble du parcours à part les pics de consommation que l'on a connus avec les données LAVIA. La performance du modèle pour ce trajet est donnée dans le tableau 2.6.

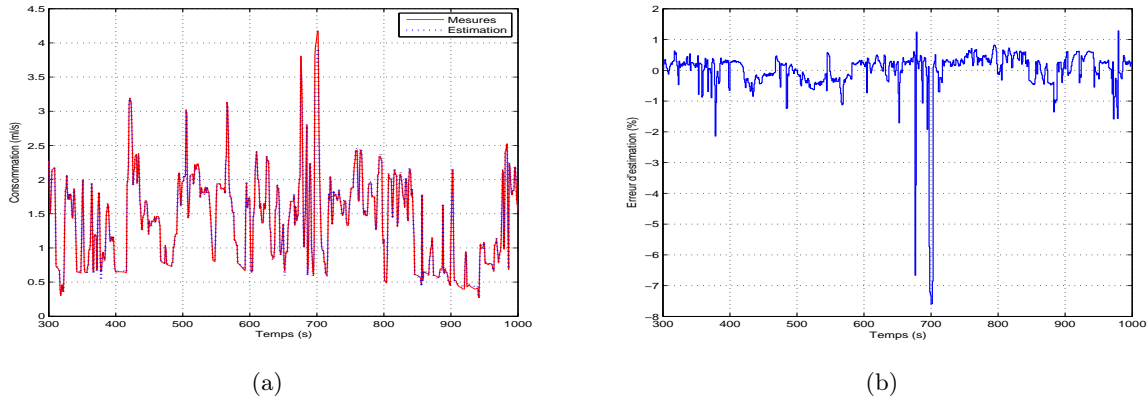


FIG. 2.16: Estimation avec le modèle 2.50

TAB. 2.5: Valeurs des coefficients du modèle (2.50) pour le Renault Clio Eco2

β_1	β_2	β_3	β_4
$8.0 * 10^{-5}$	$1.7 * 10^{-7}$	$2.4 * 10^{-8}$	$5.0 * 10^{-6}$
α	γ	θ	
$1.4 * 10^{-4}$	$1.4 * 10^{-7}$	$2.5 * 10^{-7}$	

Le même modèle est utilisé pour estimer la consommation totale sur un autre trajet entre Paris et Lille. Les figures 2.19a et 2.19b présentent les résultats de l'évaluation de la consommation instantanée.

On remarque que la performance du modèle (2.50) est meilleure sur ce trajet par rapport à l'exemple précédent.

Ces deux exemples nous permettent donc de confirmer la validité du modèle de consommation de carburant développé précédemment pour le véhicule Renault Clio Eco2.

Conclusion

Cette deuxième partie du chapitre "Modélisation" a présenté les différents modèles de consommation en carburant du véhicule et propose un nouveau modèle fondé sur le régime moteur et le couple moteur. Le modèle est développé avec les données du projet LAVIA puis validé sur les données de la Renault Clio Eco2 sur lequel nous allons conduire des tests pour le système final.

On remarque que la performance du modèle est mieux adaptée au véhicule Laguna mais sa performance pour évaluer la consommation en carburant de notre deuxième véhicule reste largement acceptable. De plus, le modèle très simple, nous permet de gagner du temps d'évaluation de la consommation par rapport à une solution consistant à utiliser la cartographie du moteur dont on ne dispose pas pour la Clio.

L'inconvénient de ce modèle est qu'il dépend du régime moteur et du couple moteur. Bien que ces deux paramètres contiennent implicitement des influences des autres paramètres sur la consommation, ils ne sont pas toujours facilement accessibles sur tous les véhicules. Il est donc intéressant de pouvoir mettre en évidence d'autres paramètres plus faciles à mesurer dans le

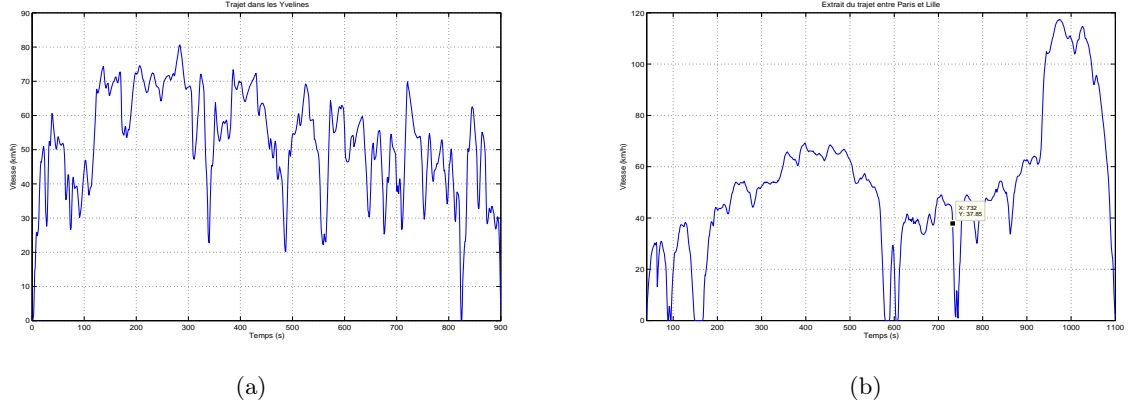


FIG. 2.17: Comparaison de la réponse du modèle aux données réelles

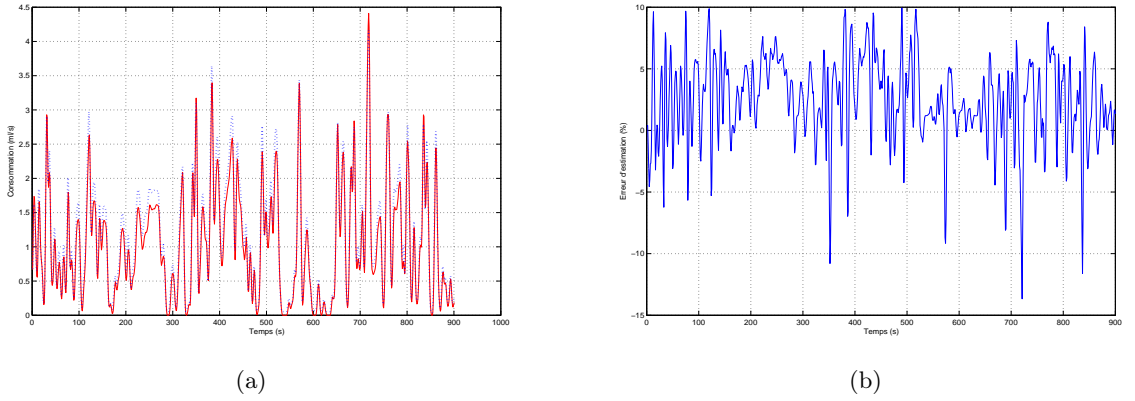


FIG. 2.18: Estimation sur un trajet dans les Yvelines

modèle d'estimation de la consommation comme la vitesse, l'accélération, la pente, le rapport de boîte,... Une première tentative consiste à développer le modèle (2.50). En effet, le régime moteur peut être remplacé par la vitesse et le rapport de réduction totale. Le couple moteur peut être estimé avec l'équation (2.22) contenant le rapport de boîte, la vitesse, l'accélération, et les différents paramètres du véhicule.

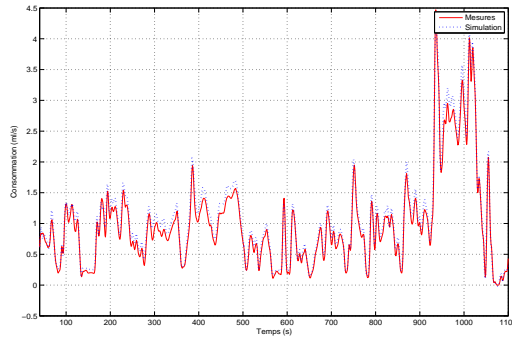
$$fc = \begin{cases} \beta_1 + \beta_2 N_t v + \beta_3 N_t^2 v a + \beta_4 v a + \beta_5 v + \beta_6 v^3 \\ + \beta_7 v \sin(\theta) + \beta_8 N_t a + \beta_9 \frac{a}{N_t} + \beta_{10} \frac{1}{N_t} & T_e > 0 \\ + \beta_{11} \frac{v^2}{N_t} + \beta_{12} \frac{\sin(\theta)}{N_t} & \\ \alpha_1 + \alpha_2 N_t v + \alpha_3 N_t^2 v^2 & T_e \leq 0 \end{cases} \quad (2.51)$$

avec les coefficients β_i et α_i dépendant des différents paramètres du véhicule (rayon de la roue, inerties du moteur, rapport différentiel,...).

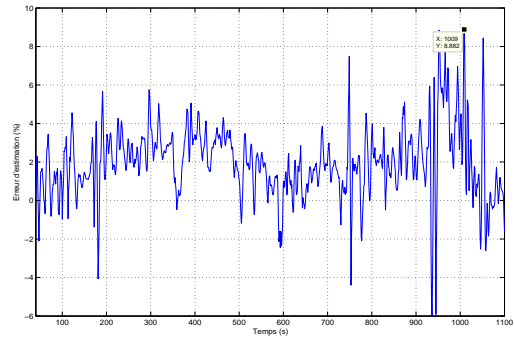
Ce modèle fait intervenir plusieurs paramètres à identifier et ne s'avère pas très précis pour

TAB. 2.6: Résultats du trajet dans les Yvelines

ϵ	$\frac{\text{mean}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{ \epsilon_{fc} }{\text{max}(fc)} < 7\%$
$\epsilon(\%)$	3.4115	13.66	93.1188



(a)



(b)

FIG. 2.19: Estimation sur le trajet entre Paris et Lille

TAB. 2.7: Résultats du trajet entre Paris et Lille

ϵ	$\frac{\text{mean}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_{fc})}{\text{max}(fc)}$	$\frac{ \epsilon_{fc} }{\text{max}(fc)} < 7\%$
$\epsilon(\%)$	2.1898	12.14	99

le véhicule Renault Clio Eco2. Les données LAVIA ne contiennent pas de pente de la route pour être testées.

Finalement, il faut peut-être modéliser de façon encore plus précise les différentes forces appliquées au véhicule pour obtenir un meilleur modèle. De plus, l'évaluation de l'ensemble des modèles présentés sur une période plus longue (de cinq à dix secondes au lieu d'une seconde) peut être intéressant pour d'autres applications. Ce serait peut-être une voie à développer dans l'avenir.

Chapitre 3

Problème d'optimisation de consommation de carburant

Sommaire

3.1	Formulation du problème d'optimisation	54
3.1.1	Équation dynamique du système	54
3.1.2	Critère	55
3.1.3	Contraintes	55
3.1.4	Problème de contrôle optimal	57
3.2	Méthodes numériques d'optimisation	58
3.2.1	Revue des méthodes	58
3.2.2	Programmation Quadratique Successive (SQP)	60
3.2.3	Programmation dynamique (PD)	62
3.3	Résolution d'un problème simple	64
3.3.1	Hypothèses simplificatrices	64
3.3.2	Problème sous forme discrétisée	67
3.3.3	Application de la méthode SQP	68
3.3.4	Application de la programmation dynamique	72
3.3.5	Comparaison des deux méthodes	73
3.4	Conclusions	75

On sait depuis très longtemps que le comportement des automobilistes a des influences significatives sur la consommation de carburant du véhicule. Il est par contre difficile de savoir exactement comment il faut conduire pour consommer le moins.

Schwarzkopf et Leipnik [SL77] semblent avoir été les premiers à traiter ce problème par la mise en place d'un problème de contrôle optimal. Ils calculent les trajectoires d'accélération optimales d'une position d'arrêt à une vitesse de croisière donnée. Des polynômes quadratiques sont utilisés pour modéliser les mouvements longitudinaux du véhicule. Le problème est résolu par le principe du maximum de Pontryagin. Par la suite, Hooker [Hoo88, Hoo83] a présenté une approche qui était sensée résoudre le compromis entre l'approche empirique dont les conclusions se sont fondées directement sur les résultats de tests et l'approche utilisant les modèles de véhicule. Pour cela, il a construit un simulateur qui était susceptible de fournir un comportement réaliste du véhicule en condition de circulation réelle. Le simulateur est ensuite utilisé pour évaluer la fonction de coût et prédire les mouvements longitudinaux du véhicule dans le problème de contrôle optimal. La programmation dynamique a été utilisée pour résoudre ce problème. L'inconvénient de cette

approche réside justement dans la volonté de réaliser un simulateur. En effet, cette approche demande un grand investissement pour construire le simulateur. On se doute bien qu'il est presque impossible de le faire pour tous les types de véhicules. Par contre, ce qui nous semble très intéressant dans ces travaux, est l'utilisation de la programmation dynamique pour résoudre le problème de contrôle optimal. Ces travaux ont de plus inspiré d'autres auteurs qui ont proposé des améliorations et de nouvelles approches. Monastyrsky [MG93] a réussi à diminuer le temps d'exécution de l'algorithme d'optimisation en utilisant une seule itération dans les calculs et en formulant le problème comme dépendant de la distance au lieu du temps. Ainsi une fonction coût comprenant le temps de trajet et la consommation a été proposée. Plus récemment, les travaux de Nouvelière [LBML08, LBM⁺08] et de Hellstrom [HFN05] ont utilisé la programmation dynamique pour calculer les profils optimaux dans le cadre des véhicules lourds (bus et poids lourd). Ce sont d'ailleurs les deux études les plus abouties sur le problème de réduction de la consommation en carburant dans le transport routier avec la naissance d'un système d'aide à la conduite informatif pour le premier et actif pour l'autre.

On remarque alors que l'ensemble des travaux privilégie l'utilisation de la programmation dynamique, mais ce choix n'est pas encore justifié par les auteurs. L'objectif de ce chapitre est alors double. D'un côté, on souhaite présenter l'application de la programmation dynamique dans le contexte d'un véhicule léger (où aucun travail n'a pour l'instant été réalisé). De l'autre côté, on souhaite donner quelques éléments pour justifier l'utilisation de la programmation dynamique pour ce type de problème. Cet objectif est réalisé à l'aide d'une revue des méthodes dans un premier temps et par des simulations dans un deuxième temps pour le cas de la Programmation Quadratique Successive (SQP).

Le chapitre commence par la formulation du problème tout en tenant compte des différentes contraintes et des points particuliers. Ensuite, la revue des méthodes nous permet de limiter le nombre de méthodes susceptibles de résoudre le problème formulé. Une investigation plus profonde de la méthode SQP et de la Programmation dynamique (PD) sur un exemple simple nous permet de justifier le choix de la dernière technique [LNM10a, LNM10b].

3.1 Formulation du problème d'optimisation

La formulation du problème d'optimisation comporte les différentes étapes suivantes. On commence par une étude du système considéré qui est l'équation dynamique longitudinale du véhicule. Ensuite, la formulation du critère utilisé est examinée avec comme base le modèle de consommation instantanée présentée dans le chapitre précédent. Les différentes contraintes du problème sont ensuite passées en revue pour finalement mettre le problème sous forme d'un problème de contrôle optimal classique.

3.1.1 Équation dynamique du système

L'évolution du véhicule est définie par le système d'équations (2.24). Il fait intervenir des variables de la dynamique du véhicule comme la vitesse et l'accélération longitudinales ; du moteur et du système de transmission telles que le couple moteur, le couple de freinage, le rapport de boîte et différentes constantes comme le rayon de la roue, la masse du véhicule, le rapport du différentiel.... Ce système d'équation peut être mis sous la forme d'une équation de la forme :

$$\dot{X} = f(X, U, \theta) \tag{3.1}$$

avec $X = \begin{pmatrix} x \\ v \end{pmatrix}$ le vecteur d'état et $U = \begin{pmatrix} T_e \\ T_b \\ rb \end{pmatrix}$ le vecteur de commande. Les variables d'état sont la distance x et la vitesse v . Les variables de contrôle sont le couple moteur T_e , le couple de freinage T_b et le numéro du rapport de boîte rb . La fonction f est détaillée par l'équation (3.2) :

$$f(X, U) = \begin{cases} \frac{v}{Mr^2 + I_{et}N_f^2N_t^2(rb) + I_{dw}}(\eta N_f N_t(rb) T_e \\ -T_b - r(MgC_R + \frac{1}{2}\rho SC_x v^2 + Mgsin\theta)) \end{cases} \quad (3.2)$$

Dans cette formulation, la pente θ est considérée comme une perturbation externe connue.

On a donc un système avec deux variables d'état et trois variables de commande. Il s'agit ici d'un système non linéaire et hybride avec des variables continues (la vitesse, la distance, le couple moteur et le couple de freinage) et une variable discrète (le rapport de boîte de vitesse).

3.1.2 Critère

Il s'agit dans notre cas, de minimiser la consommation totale de carburant du véhicule sur un trajet donné. Pour cela, le critère de coût prend forme d'une somme des consommations instantanées du véhicule. Par ailleurs, la consommation instantanée du véhicule est évaluée par l'équation (2.50) qui relie la consommation du véhicule au régime moteur ω_e et au couple moteur T_e . Le coût total pour un trajet défini par l'intervalle de temps $[t_0, t_1]$ s'écrit alors :

$$FC = \int_{t_0}^{t_1} fc(\omega_e(t), T_e(t), t) dt \quad (3.3)$$

avec fc la consommation instantanée du véhicule et FC la consommation totale sur le trajet en ml .

Par la prise en compte de la relation entre le régime moteur ω_e et la vitesse v , le critère de coût (3.3) se transforme en une fonction dépendant des variables d'état et de commande :

$$FC = \int_{t_0}^{t_1} fc(rb(t), v(t), T_e(t), t) dt \quad (3.4)$$

Pour simplifier l'écriture, nous omettrons la variable t des variables et nous noterons simplement rb, ω_e, T_e .

3.1.3 Contraintes

Les contraintes imposées aux variables d'état et de commande sont liées à la performance du véhicule, au confort du passager et à la condition de circulation. Ces contraintes se traduisent souvent par un intervalle borné des valeurs admissibles pour chaque variable.

La première contrainte concerne le couple moteur et le couple de freinage. L'équation (2.9) exprime le couple moteur en fonction du régime moteur et de la position de la pédale d'accélération. Il varie dans un intervalle limité par le couple moteur maximal T_{eub} et le couple moteur minimal T_{elb} . Cette contrainte s'écrit sous la forme :

$$T_{elb} \leq T_e \leq T_{eub} \quad (3.5)$$

Le couple moteur maximum T_{eub} peut être défini par une équation d'ordre 2 dans le cas du véhicule Renault Laguna ou défini par un système d'équations dans le cas du véhicule Renault Clio Eco2 (voir Annexe A.1).

Le couple moteur minimum T_{elb} , aussi appelé "le frein moteur", dépend du régime moteur par la relation (3.6) :

$$T_{eub} = \alpha_1 + \alpha_2 \omega_e + \alpha_3 \omega_e^2 \quad (3.6)$$

Dans les véhicules modernes, l'utilisation du "frein moteur" permet de couper l'injection de carburant dans la chambre de combustion et par conséquent permet au véhicule de décélérer sans consommer de carburant. Ce qui n'est pas le cas avec l'utilisation de la pédale de freinage. Ainsi le couple de freinage permet de décélérer le véhicule au besoin. La contrainte sur cette variable s'écrit :

$$0 \leq T_b \leq T_{bub} \quad (3.7)$$

Par ailleurs, les contraintes sur le régime moteur dépendent de la vitesse pratiquée et du rapport de boîte. Dans le cas d'une boîte de vitesses à 5 rapports rb , on peut définir l'ensemble Rb des rapports de boîte par $Rb = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. L'ensemble des régimes admissibles se définit alors par :

$$\omega_{elb}(rb) \leq \omega_e \leq \omega_{eub}(rb), rb \in Rb. \quad (3.8)$$

Passons maintenant aux contraintes relatives à la dynamique du véhicule. Il s'agit alors de la vitesse et de l'accélération longitudinales dans notre cas.

Si les vitesses minimale et maximale du véhicule dépendent de sa performance, la vitesse pratiquée dépend du trajet et des conditions de trafic. Sur une autoroute par exemple, la vitesse est limitée entre 60 km/h et 130 km/h. Alors, la contrainte de vitesse dans ce cas est l'intervalle $[60; 130]$. On écrit cette contrainte sous la forme :

$$v_{lb} \leq v \leq v_{ub}. \quad (3.9)$$

Dans la perspective d'un système à la fois écologique et sécuritaire, la limitation supérieure de la vitesse va être fixée par la contrainte de vitesse la plus contraignante parmi les différentes consignes de vitesses qu'on peut rencontrer : la limitation de vitesse légale, la limitation de vitesse à l'approche d'un virage, la limitation de vitesse due à des travaux,... La contrainte inférieure est égale à la vitesse minimale à adopter sur la route.

De même, on définit les contraintes sur l'accélération et la décélération avec l'équation (3.10).

$$a_{lb} \leq \dot{v} \leq a_{ub} \quad (3.10)$$

Pour améliorer le confort du passager, on doit limiter les trop forts à-coups. La variable représentative du confort est la dérivée de l'accélération, appelée "le jerk". Plus ce paramètre est faible, meilleur est le confort du passager. Cette contrainte est présentée de la façon suivante :

$$jerk_{lb} \leq \ddot{v} \leq jerk_{ub} \quad (3.11)$$

On peut aussi avoir les contraintes initiales et finales des variables d'états relatives au trajet définies (3.12) :

$$\begin{cases} x(t_0) &= x_0 \\ x(t_1) &= x_f \\ v(t_0) &= v_0 \\ v(t_1) &= v_f \end{cases} \quad (3.12)$$

En résumé, l'ensemble des contraintes s'écrit sous la forme d'un système de contraintes d'égalité et d'inégalités :

$$\left\{ \begin{array}{ll} (T_e - T_{elb}) * (T_e - T_{eub}) & \leq 0 \\ T_b * (T_b - T_{bub}) & \leq 0 \\ (\omega_e - \omega_{elb}) * (\omega_e - \omega_{eub}) & \leq 0 \\ (v - v_{lb}) * (v - v_{ub}) & \leq 0 \\ (\dot{v} - a_{lb}) * (\dot{v} - a_{ub}) & \leq 0 \\ (\ddot{v} - jerk_{lb}) * (\ddot{v} - jerk_{ub}) & \leq 0 \\ x(t_0) & = x_0 \\ x(t_1) & = x_f \\ v(t_0) & = v_0 \\ v(t_1) & = v_f \\ rb \in Rb & \end{array} \right. \quad (3.13)$$

On voit qu'avec deux variables d'état que sont la distance et la vitesse, certaines contraintes ne peuvent pas être prises en compte, notamment le jerk. Pour ne pas avoir à augmenter la dimension du problème, cette contrainte ne va pas être retenue dans un premier temps.

3.1.4 Problème de contrôle optimal

Notre problème peut maintenant être mis sous la forme d'un problème d'optimisation classique ayant pour critère de coût l'expression donnée par l'équation (3.4) sous les contraintes données par les systèmes d'équations (3.1, 3.13). On a d'un côté les contraintes d'égalités qui s'écrivent sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_i(X) = 0 \\ i = 1, \dots, p \end{array} \right. \quad (3.14)$$

et de l'autre côté des contraintes d'inégalités (3.15) :

$$\left\{ \begin{array}{l} G_j(X, U) \leq 0 \\ j = 1, \dots, q \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Le problème de contrôle optimal à résoudre s'écrit alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{U^*} FC(U, X) \\ \dot{X} = f(X, U, \theta) \\ H_i(X) = 0, \quad i = 1, \dots, p \\ G_j(X, U) \leq 0, \quad j = 1, \dots, q \\ rb \in Rb \end{array} \right. \quad (3.16)$$

Il faut noter qu'on obtient avec cette formulation les commandes optimales que sont le couple moteur, le couple de freinage et le rapport de boîte. Des variables d'état optimales sont obtenues par utilisation de l'équation (3.1) avec les commandes optimales trouvées et les conditions initiales.

On a donc un problème de contrôle optimal :

- *hybride*, car il comporte à la fois des variables continues (vitesse, accélération, couple moteur,...) et discrètes (rapport de boîte de vitesse);
- *non différentiable*, car certaines variables sont discrètes

– *non linéaire*, car l'équation dynamique du système et la fonction coût le sont.

Ces points particuliers limitent le nombre de méthodes envisageables pour résoudre le problème formulé.

3.2 Méthodes numériques d'optimisation

3.2.1 Revue des méthodes

Les techniques d'optimisation rencontrées dans la littérature peuvent être classées en deux catégories : les méthodes exactes de contrôle optimal et les méthodes heuristiques.

Les méthodes heuristiques [Bäc95, Koz90] sont l'ensemble des techniques qui consistent à rechercher, à moindre coût, une solution dont il n'est pas possible de garantir la qualité. La plupart de ces méthodes utilisent des processus aléatoires. C'est une des raisons pour lesquelles on les appelle parfois les méthodes "stochastiques". Elles sont caractérisées par une série des paramètres de contrôle dont le choix peut être déterminant pour la qualité de la solution. Parmi ces méthodes, on distingue celles développées pour des problèmes spécifiques et les méthodes adaptables à un grand nombre de problèmes différents sans changement majeurs dans l'algorithme que l'on appelle aussi les méthodes "méta-heuristiques" comme le recuit simulé, la recherche tabou ou les algorithmes génétiques. Ces méthodes, dont l'origine se trouve dans la biologie ou dans la thermodynamique, sont de plus en plus utilisées dans d'autres domaines, notamment l'automobile.

Le recuit simulé [KGV83, Cer85], par exemple, trouve ses origines dans la thermodynamique. Cette méthode est issue d'une analogie entre le phénomène physique de refroidissement lent d'un corps en fusion, qui le conduit à un état solide, de basse énergie. Il faut abaisser lentement la température, en marquant des paliers suffisamment longs pour que le corps atteigne l'"équilibre thermodynamique" à chaque palier de température. Pour les matériaux, cette basse énergie se manifeste par l'obtention d'une structure régulière, comme dans les cristaux et l'acier. L'analogie exploitée par le recuit simulé consiste à considérer une fonction f à minimiser comme fonction d'énergie, et une solution x peut être considérée comme un état donné de la matière dont $f(x)$ est l'énergie. Le recuit simulé exploite généralement le critère défini par l'algorithme de Metropolis [MRR⁺53] pour l'acceptation d'une solution obtenue par perturbation de la solution courante [Che99, SC98].

La recherche tabou [Che99] est un autre exemple des méthodes méta-heuristiques originellement développées par Glover [Glo86] et indépendamment par Hansen [Han86]. Cette méthode combine une procédure de recherche locale avec un certain nombre de règles et de mécanismes permettant à celle-ci de surmonter l'obstacle des optima locaux [CGH96, Ree95]. Le principe de base de cette méthode est le suivant. En partant d'une solution quelconque x appartenant à l'ensemble de solutions X , on se déplace vers une solution $s(x)$ située dans le voisinage $[S(x)]$ de x . L'algorithme explore itérativement l'espace de solutions X . Afin de choisir le meilleur voisin $s(x)$ dans $S(x)$, l'algorithme évalue la fonction objectif f en chaque point $s(x)$ et retient le voisin qui améliore la valeur de la fonction objective f ou au pire celui qui la dégrade le moins. Ce principe, qui accepte la dégradation de la fonction objective, permet d'éviter les pièges des minima locaux. Par contre, cela expose au risque de tomber dans un cycle. Pour éviter ce problème, il faut qu'on conserve pendant un moment la trace des dernières meilleures solutions déjà visitées. Ces solutions sont déclarées tabou, d'où le nom de la méthode. La liste des solutions tabou induit par conséquent l'encombrement de la mémoire. Certaines idées sont apportées pour corriger ces défauts, notamment les travaux de [Glo86].

Les algorithmes génétiques, utilisent, quant à eux, les concepts issus du milieu biologique mais connaissent certains succès dans d'autres domaines [Che99, All96, BB97]. Les "individus" sont utilisés pour représenter chacun une solution du problème que l'algorithme est sensé résoudre. L'ensemble des individus forment une "population". Chaque itération de l'algorithme sur cette population engendre une nouvelle "génération". Lors de chaque génération, une série de transformations est appliquée aux individus pour obtenir la génération suivante. Les individus utilisés dans ces transformations sont appelés "parents" et les individus issus de celles-ci sont appelés "enfants". Le processus est réitéré jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

Bien que ces méthodes se prêtent à des extensions pour des problèmes d'optimisation dynamique et multi-objectifs, elles montrent des inconvénients majeurs. Tout d'abord, elles demandent un encombrement mémoire variable et induisent presque toujours un temps de calcul prohibitif. En plus, comme elles sont caractérisées par une série de paramètres de contrôle, la difficulté de réglage est alors non négligeable. [Del02] fait état de temps de calcul long et de réglage de paramètres délicat en testant le recuit simulé pour le cas d'un véhicule hybride. Le problème des solutions locales est aussi souligné. Concernant les algorithmes génétiques, ses inconvénients sont bien connus et il n'y a pas, à notre connaissance, une mise en place de ces méthodes pour un problème d'optimisation de consommation dans le secteur automobile. [DG97, Ros04, CFA⁺06] faisaient l'état de la nécessité de procéder à beaucoup de réglages et signalent un encombrement mémoire pour des études dans le domaine aéronautique. Et surtout, la formulation du problème en termes de génétique n'est pas non plus très intuitive.

Sur un autre plan, on a les méthodes exactes issues du contrôle optimal, qui permettent l'obtention de l'optimum global, au prix d'une complexité, d'un temps de calcul et d'un encombrement mémoire variables. Parmi celles-ci, on trouve la programmation dynamique [Bel57, P.03, SDrT⁺05, Bor00, Bor00, Bor00, Cul98, Fle91, Gol89, Hol92, PR05, Rec94], qui calculent des commandes en boucle fermée et les méthodes itératives qui utilisent le lagrangien par pénalisation exacte et par linéarisation des contraintes. On trouve aussi des méthodes duales qui utilisent les algorithmes comme celui d'Uzawa, Arriw-Hurwicz [Cul98, S.L06] et les méthodes primales utilisant les algorithmes comme celui de la programmation quadratique successive [Cul98, Tré03]. Le principe du maximum de Pontryagin est aussi généralement utilisé pour les calculs des trajectoires optimales et des commandes en temps minimal par les calculs de variation [Cul98, J.S04]. Leurs solutions sont des commandes en boucle ouverte [Cul98, Tré03, EBL05].

Ces méthodes sont pour la plupart reconnues pour résoudre les problèmes de contrôle optimal linéaire et non linéaire. Mais certaines ont été étendues pour résoudre les problèmes d'optimisation hybrides. Ce fût le cas par exemple du principe du maximum présenté dans [Pic99, Sus99]. Dans cette application, le principe du maximum n'est utilisé que pour la partie continue du système pendant l'intervalle où il n'y a pas d'événement discret. Ensuite, l'approche numérique de la programmation dynamique est une solution envisageable pour ce problème. En effet, cette approche ne nécessite pas le gradient des fonctions coût pour trouver l'optimum. Ce qui signifie que l'existence des variables discrètes et donc non différentiables dans le problème ne constitue pas un obstacle. A l'inverse des algorithmes de tir, qui sont des processus aléatoires, cette approche est déterministe si on peut prédire l'évolution du système. Cette condition est vérifiée dans notre cas. Par contre, son plus grand inconvénient réside dans l'effort de calcul avec une variation exponentielle en fonction de la dimension de l'espace d'état.

Pour conclure sur cette revue, on voit bien que les méthodes heuristiques ne sont pas très adaptées à notre problème, tandis que la résolution du problème hybride non linéaire doit recourir à des méthodes très complexes. Notre approche consiste alors, dans un premier temps, à résoudre un problème plus simple pour prouver l'efficacité de la programmation dynamique.

Pour cela, on utilisera deux des méthodes parmi les plus utilisées que sont la programmation

dynamique et la programmation quadratique successive (ou séquentielle).

3.2.2 Programmation Quadratique Successive (SQP)

Le principe de la méthode SQP repose sur une reformulation itérative du problème de programmation non linéaire (NLP) en un problème de programmation quadratique (QP), au moyen d'une approximation quadratique du lagrangien de la fonction coût et d'une linéarisation des contraintes. Le problème QP résiduel est ensuite résolu, pour chaque itération.

Un des points forts de la méthode SQP réside dans son caractère "chemin non-faisable" : la progression vers la solution optimale est effectuée à partir de points intermédiaires "faisables", mais aussi "non faisables", proches du domaine des contraintes. Ainsi, contrairement à de nombreuses méthodes qui vérifient les contraintes à chaque itération, la méthode SQP n'impose le respect des contraintes que pour la solution finale.

Avant de présenter l'algorithme SQP, il est nécessaire de rappeler le système d'optimalité sur lequel est fondée la méthode.

Contraintes d'égalité

Dans le cas du problème avec seulement des contraintes d'égalité, le problème à résoudre s'écrit :

$$\min J(x), x \in \mathbb{R}^n, h(x) = 0 \quad (3.17)$$

avec $h(x) = (h_1(x), \dots, h_p(x))$ et h est continue de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^p .

Théorème 3.2.1 *On suppose que*

- J et h sont de classe C^1 sur \mathbb{R}^n
- le problème a une solution x^*
- les p vecteurs de $\mathbb{R}^n : (\nabla h_1(x^*), \dots, \nabla h_p(x^*))$ sont linéairement indépendants (et donc $p \leq n$);

alors il existe p réels $(\lambda_1^*, \dots, \lambda_p^*)$ tels que

$$\nabla J(x^*) + \sum_{i=1}^p \lambda_i^* \nabla h_i(x^*) = 0. \quad (3.18)$$

Définition 3.2.1 *Les réels λ_i^* obtenus par le théorème précédent sont appelés des **multiplieurs de Lagrange**.*

Contraintes d'égalité et d'inégalité

Le problème à résoudre est de la forme

$$(\mathcal{P}) \quad \min J(x), x \in \mathbb{R}^n, x \in C \quad (3.19)$$

où $C = \{x \in \mathbb{R}^n \mid h(x) = 0, g(x) \leq 0\}$

La condition Karush-Kuhn-Tucker pour ce problème est donnée par le théorème suivant :

Théorème 3.2.2 *On suppose que J, h et g sont de classe C^1 . soit x^* régulier pour les contraintes h et g . Alors il existe $\lambda^* = (\lambda_1^*, \dots, \lambda_p^*) \in \mathbb{R}^p$ et $\mu^* = (\mu_1^*, \dots, \mu_q^*) \in \mathbb{R}^q$ tels que*

$$\begin{aligned}
 h_i(x^*) &= 0, \forall i \in \{1, \dots, p\} \\
 g_j(x^*) &\leq 0, \forall j \in \{1, \dots, q\} \\
 \mu_j &\geq 0, \forall j \in \{1, \dots, q\} \\
 \mu_j^* g_j(x^*) &= 0, \forall j \in \{1, \dots, q\} \\
 \nabla J(x^*) + \sum_{i=1}^p \lambda_i^* \nabla h_i(x^*) + \sum_{j=1}^q \mu_j^* \nabla g_j(x^*) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

p et q correspondent au nombre d'égalités et d'inégalités.

Définition 3.2.2 On appelle Lagrangien du problème \mathcal{P} la fonction définie sur $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q$

$$\mathcal{L}(x, \lambda, \mu) = J(x) + \sum_{i=1}^p \lambda_i h_i(x) + \sum_{j=1}^q \mu_j g_j(x) \tag{3.21}$$

Algorithme SQP [Ber01]

On a vu que la solution x^* du problème est un point critique du Lagrangien \mathcal{L} , mais ce n'est pas en général un minimum de ce Lagrangien. Nous allons établir une méthode de descente qui exploite le système d'optimalité établi dans le théorème sur la condition KKT. L'idée est de résoudre une succession de problèmes quadratiques avec contraintes linéaires qui sont des approximations du problème de départ.

Étant donné un itéré x_k , on cherche

$$x_{k+1} = x_k + \rho_k d_k,$$

où $d_k \in \mathbb{R}^n$ est une direction de descente et $\rho_k > 0$, le pas. Commençons par faire une approximation des contraintes h grâce à la formule de Taylor :

$$h_i(x_k + d) = h_i(x_k) + \nabla h_i(x_k) \cdot d + \mathcal{O}(\|d\|^3)$$

Si on néglige les termes d'ordre supérieur ou égal à 2, on définit la direction d_k comme étant la direction permettant d'assurer que $h_i(x_k + d) \simeq 0$. Plus précisément, on pose

$$h_i(x_k) + \nabla h_i(x_k) \cdot d_k = 0, \forall i = 1, \dots, q,$$

c'est à dire

$$Dh(x_k) d_k = -h(x_k) \tag{3.22}$$

où $Dh(x_k)$ est la matrice Jacobienne de h en x_k . Cette relation correspond à une linéarisation des contraintes au voisinage de x_k : c'est un système linéaire.

D'autre part, il faudrait que x_{k+1} diminue la valeur du Lagrangien (puisque que le Lagrangien joue le rôle de la fonction coût, quand on a des contraintes). De manière similaire, on fait une approximation du Lagrangien $\mathcal{L}(x, \lambda) = J(x) + \lambda^t h(x)$: elle sera quadratique cette fois, puisque le point recherché est un point critique et qu'on ne peut se contenter d'une approximation du premier ordre.

$$\mathcal{L}(x_k + d, \lambda) = \mathcal{L}(x_k, \lambda) + (\nabla_x \mathcal{L}(x_k, \lambda), d) + \frac{1}{2} (D_{xx}^2 \mathcal{L}(x_k, \lambda) d, d) + \mathcal{O}(\|d\|^3).$$

Si on néglige les termes d'ordre supérieur ou égal à 3, on voit qu'il faut minimiser

$$(\nabla_x \mathcal{L}(x_k, \lambda), d) + \frac{1}{2} (D_{xx}^2 \mathcal{L}(x_k, \lambda) d, d)$$

pour minimiser le Lagrangien. On cherche donc finalement d_k comme solution du problème

$$\begin{cases} \min(\nabla J(x_k), d) + \frac{1}{2}(D_{xx}^2 \mathcal{L}(x_k, \lambda)d, d) \\ Dh(x_k)d_k + h(x_k) = 0. \end{cases}$$

En effet, avec l'équation (3.22)

$$\nabla_x \mathcal{L}(x_k, \lambda), d) = (\lambda_x J(x_k), d) + \lambda^t Dh(x_k)d = (\nabla_x J(x_k), d) + \underbrace{\lambda^t h(x_k)}_{=const}$$

Il reste à déterminer le pas ρ_k et le multiplicateur λ_k à chaque itération. Dans le cas du problème avec des contraintes d'égalité et d'inégalité, le principe est le même. Seul le Lagrangien change et vaut $\mathcal{L}(x, \lambda) = J(x) + \lambda^t h(x) + \mu^t g(x)$, où $\lambda \in \mathbb{R}^p$ et $\mu \in \mathbb{R}^q$. Dans ce cas, on a donc trois paramètres à trouver à chaque itération qui sont ρ_k , λ_k , μ_k . Il y a bien sûr beaucoup de possibilités qui donnent lieu à autant de variantes de la méthode. L'algorithme de base consiste donc à adopter $\rho_k = 1$, et se présente de la forme suivante dans le cas général :

1. Initialisation :

- k=1 : choix de $x_o \in \mathbb{R}^n$ et de $(\lambda_0, \mu_0) \in \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^{q,+}$

2. Pour chaque itération k :

Résoudre le sous-problème quadratique :

$$\begin{cases} \min(\nabla J(x_k), d) + \frac{1}{2}(D_{xx}^2 \mathcal{L}(x_k, \lambda_k, \mu_k)d, d) \\ Dh(x_k)d + h(x_k) = 0 \\ Dg(x_k)d + g(x_k) \leq 0. \end{cases} \quad (3.23)$$

3. Calcul des différents coefficients de pénalité :

- $\lambda_{k+1} \in \mathbb{R}^p$ est le coefficient de pénalité associé à chaque contrainte d'égalité.
- $\mu_{k+1} \in \mathbb{R}^q$ est le coefficient de pénalité (positif) associé à chaque contrainte d'inégalité.
- $x_{k+1} = x_k + d_k$ où d_k est la direction de descente

4. Critère d'arrêt

- Si $x_k + 1$ est satisfaisant : STOP
- Sinon, on pose k=k+1 et on revient à l'étape 2.

Dans le cas général, on a le même algorithme sauf que le Lagrangien est celui défini par l'équation (3.21).

3.2.3 Programmation dynamique (PD)

La programmation dynamique permet la résolution d'un problème pour lequel des décisions doivent être prises étape par étape. A chaque étape, les décisions possibles sont évaluées comme étant la somme du coût présent et du coût futur attendu, cela suppose alors que le coût futur

a été déterminé, la résolution de la programmation dynamique consiste donc en une récurrence inverse dans le temps.

Le principe d'optimisation a été énoncé sous sa forme actuelle par Richard Bellman [Bel57], ce principe est à première vue totalement évident, mais paradoxalement, il est à la base d'une méthode d'énumération efficace et robuste, ainsi le principe d'optimalité de Bellman, tel qu'il est présenté dans [P.03, SDrT⁺05], est le suivant.

Dans un processus d'optimisation dynamique, une suite de décisions est optimale si, quels que soient l'état et l'instant considérés sur la trajectoire qui lui est associée, les décisions ultérieures constituent une suite optimale de décisions pour le sous-problème dynamique ayant cet état et cet instant comme conditions initiales.

Ce principe peut être énoncé différemment :

Soit $\pi^ = \mu_0^*, \mu_1^*, \dots, \mu_{N-1}^*$ une stratégie de commande optimale pour le problème considéré. Supposons que, lorsque μ^* est utilisé, l'état X_i est atteint au temps i . En considérant le sous-problème pour lequel, à partir de l'état X_i à l'instant i , on cherche à minimiser le coût pour aller de l'état i à N : $J(u) = \zeta_N(X_N) + \sum_{n=i}^{N-1} \zeta_k(X_n, U_n)$, alors la stratégie de commande tronquée $\pi^* = \mu_i^*, \mu_1^*, \dots, \mu_{N-1}^*$ est optimale pour ce problème*

De ce principe, on peut formuler la proposition suivante :

Pour chaque état initial X_0 , le coût optimal $J^(X_0)$ du problème est égal à $J_0(X_0)$ donné par l'algorithme récurrent suivant :*

$$J_N = \zeta_N(X_N)$$

$$J_n(X_n) = \min_{U_n} (\zeta_n(X_n, U_n) + J_{n+1}(f(X_n, U_n))) \text{ pour } n=N-1..0$$

L'équation donnée précédemment est aussi appelée l'équation récurrente de Hamilton-Bellman-Jacobi en temps discret. La résolution de cette équation se fait en deux étapes inverses, de la manière suivante :

Recherche de $U_n^* = U_n^*(X_n)$

1. Soit $J_N(X_N) = \zeta_N(X_N)$
2. Soit $n=N-1$
3. Chercher $U_n^* = \mu_n^*(X_n)$ qui satisfait

$$J_n(X_n) = \min_{U_n \in U} \{ \zeta_n(X_n, U_n) + J_{n+1}(f(X_n, U_n)) \}$$
4. Répéter l'étape 3 pour $n=N-2, N-3, \dots, 0$
5. Pour chaque état initial X_0 , le coût optimal est $J^*(x_0) = J_0(x_0)$.
6. La stratégie $\pi^* = \{\mu_0^*, \mu_1^*, \dots, \mu_{N-1}^*\}$ est optimale.

Recherche du profil optimal à partir de la condition initiale

Soit $n=0, \dots, N-1$
 Faire $U_n^* = \mu^*(X_n)$
 $x_{n+1} = f(X_n, U_n^*)$

3.3 Résolution d'un problème simple

3.3.1 Hypothèses simplificatrices

Dans cette partie, on discute sur les deux points qui peuvent simplifier notre problème initial. Le premier concerne les couples moteur et de freinage. En effet, le couple de freinage et le couple moteur sont exclusifs l'un de l'autre. Par conséquent, à part la position d'arrêt où les deux couples sont nuls, on a les trois possibilités suivantes.

- Utilisation du couple moteur : $0 < T_e \leq T_{eub}, T_b = 0$
- Utilisation du frein moteur : $T_{eib} < T_e \leq 0, T_b = 0$
- Utilisation du couple de freinage : $T_e = 0, 0 < T_b \leq T_{bub}$

On peut alors regrouper ces deux variables en une seule variable appelée T_{eb} . Dans ce cas, on a les trois mêmes situations que précédemment avec une écriture différente :

- $0 < T_{eb} \leq T_{eub}$: Utilisation du couple moteur
- $T_{eib} < T_{eb} \leq 0$: Utilisation du frein moteur
- $T_{eib} < T_b \leq T_{eib}$: Utilisation du couple de freinage

avec $T_{eib} = \frac{-T_{bub} + T_{eib}}{\eta N_f N_t}$.

Ce regroupement permet de réduire le nombre de variables de commande de trois à deux variables sans changer le comportement du système. Ce qui est très intéressant pour réduire le temps de calcul qui va être exposé dans le paragraphe §4.2.1.

Stratégie de sélection du rapport de boîte

Pour "négliger" le caractère hybride du système, la solution consiste à utiliser un modèle de boîte de vitesse qui permet de calculer la vitesse de façon indépendante. En d'autres termes, on sépare le problème d'optimisation du rapport de boîte de vitesse de notre problème d'optimisation initial. Plusieurs approches peuvent être utilisées pour optimiser le rapport de boîte pour une vitesse du véhicule donnée en fonction des conditions précises (la pente, la consommation des accessoires,...). Le principe peut être décrit par l'introduction de la notion de la consommation spécifique. Selon les motoristes, elle désigne la consommation d'un moteur en fonction de la puissance développée et de la durée pendant laquelle cette puissance est développée. Elle est usuellement chiffrée en gramme de carburant par *ch/heure* ou par *kW/h*, soit *g/ch.h* ou *g/Kw.h*. La figure 3.1 montre l'exemple des courbes iso-consommations du moteur du véhicule Renault Laguna.

Elle présente la consommation spécifique du moteur en fonction du régime et du couple moteur. Pour chaque moteur, il existe une zone de fonctionnement optimal où le rendement énergétique est le meilleur. L'objectif est de placer le point de fonctionnement du moteur le plus proche possible de cette zone avec l'utilisation adéquate du rapport de boîte de vitesse. La figure 3.2 montre un exemple de cette stratégie sur un cas du maintien de la vitesse constante.

Sur cet exemple, on a la courbe de puissance pour maintenir la voiture à 120 km/h sur route plane. Le point de fonctionnement du véhicule est l'intersection de la courbe de résistance à

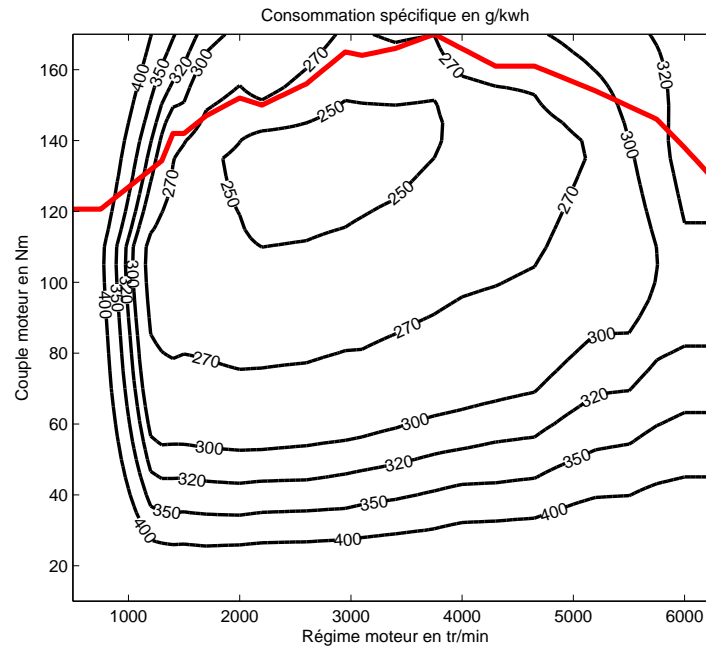


FIG. 3.1: Courbe iso-consommation du moteur du véhicule Renault Laguna

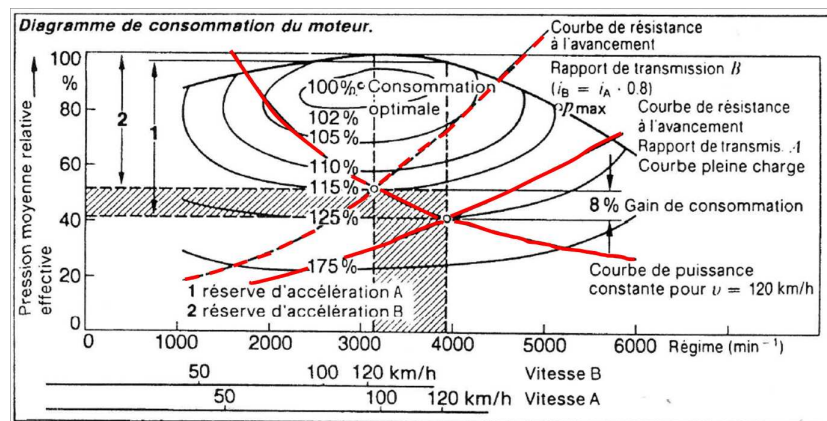


FIG. 3.2: Possibilité de choisir un meilleur point de fonctionnement du moteur avec le changement du rapport de boîte [Duy09]

l'avancement et la courbe de puissance demandée. Le fait de changer le rapport de boîte de vitesse permet de faire fonctionner le moteur à un point plus efficace énergiquement.

On voit que pour utiliser cette stratégie, on doit disposer de la cartographie de consommation du moteur. Comme cette information n'est pas disponible pour notre véhicule de test qui est le Renault Clio Eco2, on a été obligé de prendre une stratégie plus simple, qui provient d'un constat sur les tests expérimentaux.

En effet, plusieurs tests effectués dans le cadre des expériences d'éco-conduite nous permettent d'énoncer les remarques suivantes : Il faut passer au rapport de boîte de vitesse supérieur si le régime moteur est aux alentours de 2000 à 2500 tr/min et de rétrograder s'il est aux alentours de

1500 tr/min. Dans l'hypothèse prise pour notre étude (conservation de la puissance, glissement longitudinal négligé), on peut déterminer le rapport de boîte en fonction de la vitesse du véhicule. Le principe est expliqué par les figures 3.3.

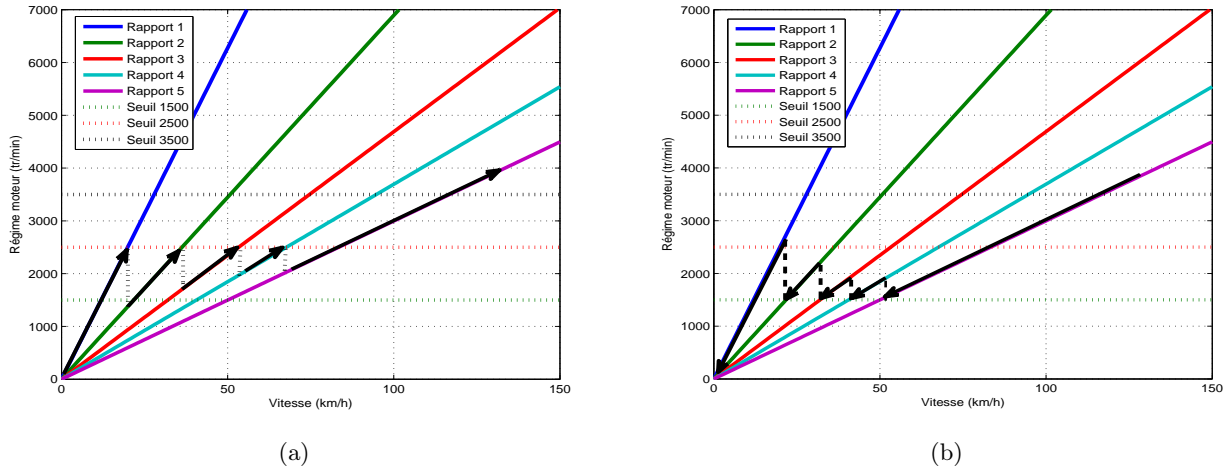


FIG. 3.3: Principe de sélection du rapport de boîte

Dans le sens croissant de la vitesse, si le régime moteur dépasse le seuil de 2500 tr/min (pour cet exemple), on passe au rapport de boîte supérieur. Dans le sens inverse, on rétrograde si le régime moteur est en-dessous du seuil inférieur (1500 tr/min pour notre exemple). Le but est donc de maintenir le régime moteur dans un intervalle à priori optimal pour un véhicule léger. Le rapport est donc déterminé par la fonction $G(v)$ qui est le modèle de boîte de vitesse présenté ci-dessus.

On voit que le modèle utilisé est simple mais pas forcément le mieux adapté. En dehors du problème du choix du seuil de basculement, un autre problème peut apparaître dans certains cas particuliers. En effet, avec l'hypothèse d'une pente faible, le fait de choisir ces seuils nous permet de garantir un fonctionnement du moteur en bas régime. Ce qui est, d'après plusieurs études très bénéfique en terme d'économie de carburant. Mais dans le cas d'une forte côte ($\theta > 10\%$), le fait de fonctionner dans cet intervalle de régime ne permet pas d'avoir une puissance suffisante pour la grimper même si on dispose du couple maximal. La figure 3.4 montre ces deux quantités du moteur TCE 100 de la Renault Clio Eco2.

La figure montre que même si à 2500 tr/min, on atteint presque le couple maximal mais pour une forte montée, la puissance du moteur reste insuffisante. Il faut donc dans ce cas monter en régime pour disposer une puissance plus élevée. Un exemple simple consiste à faire monter le véhicule à une vitesse de 50 (km/h) sur une pente de 13%. Avec les valeurs des paramètres du véhicule Renault Clio Eco2 données en Annexe A.1, la puissance requise au moteur est approximativement 37 kw. Avec le modèle de boîte actuel, à 50 km/h on atteint un régime de 2500 tr/min avec le rapport 3 et une puissance maximale d'environ 36 kw. Le véhicule peut très difficilement monter la pente. Dans ce cas, il faut donc augmenter le régime en utilisant un rapport de boîte plus faible (par exemple le deuxième). Le régime moteur est de 3500 tr/min et la puissance maximale est de 51 kw, valeur plus adaptée à la situation. En partant de cet exemple simple, on voit bien qu'il faut un seuil de changement de rapport plus élevé pour de fortes montées. C'est pour cette raison que le rapport dépend non seulement de la vitesse du

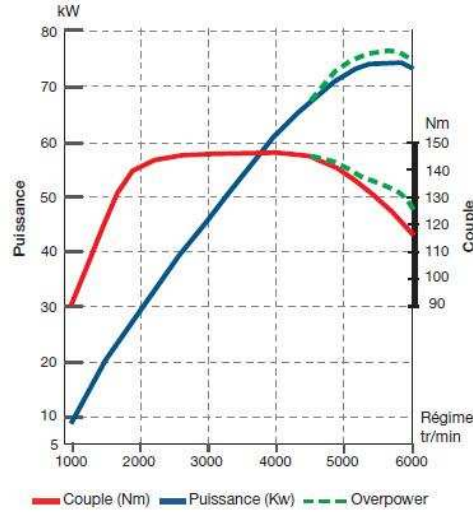


FIG. 3.4: Courbe du couple et de la puissance du moteur TCE 100 (source : Renault)

véhicule mais aussi de la pente de la route. La fonction $G(v, \theta)$ est alors utilisée pour déterminer le rapport de boîte.

On voit bien que le modèle de boîte est assez simple et n'est pas forcément très précis pour tous les véhicules. Dans un premier temps, ce modèle va être utilisé. On verra que ce modèle simple est tout de même assez satisfaisant comparé à une autre approche qui sera présentée plus loin. Le choix de ce modèle de boîte est motivé par le fait qu'on peut résoudre le problème d'optimisation par davantage de méthodes notamment par l'algorithme SQP et par la programmation dynamique. Cela nous permet de faire une comparaison entre ces deux méthodes.

3.3.2 Problème sous forme discrétisée

Le problème donné par le système d'équations (3.16) contient maintenant deux variables d'états et une variable de commande. En appliquant l'approximation des dérivées par la méthode d'Euler avec un pas de discrétisation Δt , le mouvement longitudinal du véhicule s'écrit sous la forme discrète :

$$X_{t+1} = f(X_t, U_t) \quad (3.24)$$

avec $X_t = \begin{pmatrix} x_t \\ v_t \end{pmatrix}$ les variables d'état à l'instant t et $U_t = (T_{ebt})$ la variable de contrôle à l'instant t . Les variables d'état sont la distance x_t et la vitesse v_t . La variable de contrôle est le couple T_{ebt} . Le rapport de boîte à l'étape t est déterminé par la fonction $G_t(v_t, \theta_t)$.

$$f(X_t, U_t) = \begin{cases} x_t + \Delta t * v_t \\ v_t + \Delta t * \frac{r}{Mr^2 + I_{et}N_f^2N_t^2(rb_t) + I_{dw}}(\eta N_f N_t(rb_t)T_{ebt} \\ -r(MgC_R + \frac{1}{2}\rho SC_x v_t^2 + Mgsin\theta_t)) \end{cases} \quad (3.25)$$

La formulation du problème d'optimisation sous la forme discrète s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{cases} \min_{u_0, \dots, u_{T-1}} FC \\ X_{t+1} = f(X_t, U_t, \theta_t) \\ H_i = 0, i = 1..p \\ G_j \leq 0, j = 1..q \end{cases} \quad (3.26)$$

avec le critère sous forme discrète

$$FC = \sum_{t=0}^{T-1} f_{ct}(G_t(v_t, \theta_t), v_t, T_{ebt}) * \Delta t \quad (3.27)$$

3.3.3 Application de la méthode SQP

Pour appliquer l'algorithme SQP présenté précédemment au problème décrit par l'équation (4.4), la démarche consiste à décomposer successivement le système sur une durée donnée T correspondant au temps de trajet.

$$\begin{aligned} X_1 &= f(X_0, U_0, 0) \\ X_2 &= f(X_1, U_1, 1) = f(f(X_0, U_0, 0), U_1, 1) \\ &\vdots \\ X_T &= f(X_{T-1}, U_{T-1}, T-1) = f(f(\dots f(X_0, U_0, 0), \dots, U_{T-2}, T-2), U_{T-1}, T-1) \end{aligned} \quad (3.28)$$

On remarque que la dynamique du système est fonction des conditions initiales x_0 et une stratégie de commande $U = [U_0; U_1; \dots; U_T]$. Donc, notre objectif est de déterminer cette stratégie de commande optimale suivante $U^* = [U_0^*; U_1^*; \dots; U_T^*]$ en utilisant la méthode SQP.

Inévitablement, le problème d'optimisation va dépendre uniquement des conditions initiales X_0 connues à priori et de la stratégie de commande à déterminer. D'où :

$$\begin{aligned} &\min_{U_0, \dots, U_T} J(U) \\ &G_{j,1} = G_j(X_0, U_0, 0) \leq 0 \\ &H_{i,1} = H_i(X_0, U_0, 0) = 0 \\ &G_{j,2} = G_j(X_1, U_1, 1) = G_j(f(X_0, U_0, 0), U_1, 1) \leq 0 \\ &H_{i,2} = H_i(X_1, U_1, 1) = H_i(f(X_0, U_0, 0), U_1, 1) = 0 \\ &\vdots \\ &G_{j,T} = G_j(f(\dots f(X_0, U_0, 0), U_{T-2}, T-2), U_{T-1}, T-1) \leq 0 \\ &H_{i,T} = H_i(f(\dots f(X_0, U_0, 0), U_{T-2}, T-2), U_{T-1}, T-1) = 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Finalement, l'application de la méthode SQP revient à minimiser un Lagrangien à chaque instant de discrétisation t. Le lagrangien s'écrit alors :

$$L(X_t, U_t, t) = \sum_{t=0}^T g(X_t, U_t, t) + \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^q \mu_{t,j} G_j(X_t, U_t, t) + \sum_{i=1}^p \lambda_{t,i} H_i(X_t, U_t, t) \right] \quad (3.30)$$

On pose

$$\begin{aligned} \mu'_t G(X_t, U_t, t) &= \sum_{j=1}^q \mu_{t,j} G_j(X_t, U_t, t) \\ \lambda'_t H(X_t, U_t, t) &= \sum_{i=1}^p \lambda_{t,i} H_i(X_t, U_t, t) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Donc

$$L(X_t, U_t, t) = \sum_{t=0}^T g(X_t, U_t, t) + \sum_{t=0}^T [\mu'_t G(X_t, U_t, t) + \lambda'_t H(X_t, U_t, t)] \quad (3.32)$$

Comme on a des contraintes d'égalité seulement sur les conditions terminales, le Lagrangien va s'écrire :

$$\begin{aligned} L(X_t, U_t, t) = & \sum_{t=0}^{T-1} [g(X_t, U_t, t) + \mu'_t G(X_t, U_t, t)] + [g(X_T, U_T, T) \\ & + \mu'_T G(X_T, U_T, T) + \lambda'_T H(X_T, U_T, T)] \end{aligned} \quad (3.33)$$

Finalement, le Lagrangien à minimiser est donné par l'équation suivante :

$$L(X_t, U_t, t) = \sum_{t=0}^{T-1} l(X_t, U_t, t) + \phi(X_T, U_T, T) \quad (3.34)$$

Ce Lagrangien est minimisé avec l'algorithme donné précédemment en modifiant quelques notations.

1. Initialisation :

- Pour un instant discret donné t
- k=1 choix de $u_{t,0} \in \mathbb{R}^n$ et de $(\lambda_{t,0}, \mu_{t,0}) \in \mathbb{R}^p \mathbb{R}^{+,q}$

2. Pour chaque itération k :

Résoudre le sous-problème quadratique :

$$\begin{cases} \min < \nabla_U J(U_{t,k}, d) > + \frac{1}{2} < D_{UU}^2 L(X_{t,k}, U_{t,k}, t, \lambda_{t,k}, \mu_{t,k}) d, d > \\ \nabla_U H(x_{t,k}, U_{t,k}, t) d + H(X_{t,k}, U_{t,k}, t) = 0 \\ \nabla_U G(x_{t,k}, U_{t,k}, t) d + G(X_{t,k}, U_{t,k}, t) \leq 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

3. Calcul des différents coefficients de pénalité :

- $\lambda_{t,k+1} \in \mathbb{R}^p$ est le coefficient de pénalité associé à chaque contrainte d'égalité.
- $\mu_{t,k+1} \in \mathbb{R}^q$ est le coefficient de pénalité (positif) associé à chaque contrainte d'inégalité.
- $U_{t,k+1} = U_{t,k} + d_{t,k}$ où $d_{t,k}$, la direction de descente

4. Critère d'arrêt

- Si $U_{t,k+1}$ est satisfaisant : STOP
- Sinon, on pose k=k+1 et on revient à l'étape 2.

Cet algorithme est mis en place avec la routine fmincon sous Matlab. On présente par la suite les résultats de simulations obtenus par cette méthode.

Résultats de simulations

Le scénario utilisé est un trajet entre deux arrêts, distants de 800 m. Le temps du trajet est fixé à 60 secondes avec une vitesse limitée à 90 km/h. La pente est supposée nulle. Le couple T_{eb} est limité entre 170 Nm (le couple moteur maximal) et -200 Nm. Le véhicule est en frein moteur si le couple $T_{eb} \in [0, -20]$. Les profils optimaux de vitesse et de couple sont donnés sur la figure 3.5 :

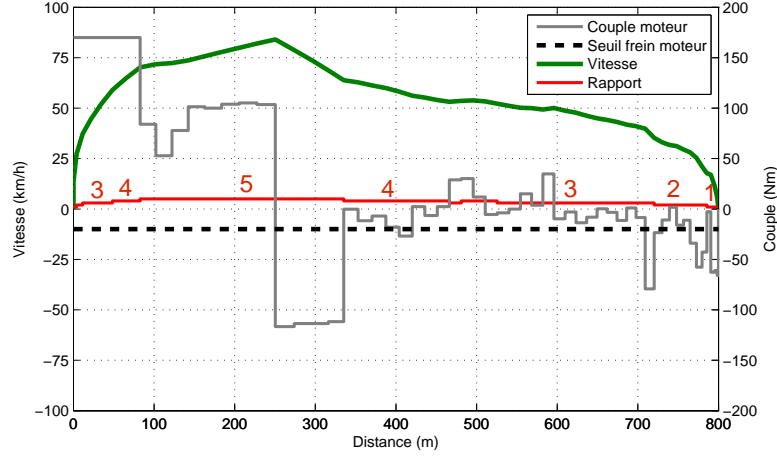


FIG. 3.5: Profils optimaux obtenus avec l'algorithme SQP

On voit sur cette figure que les contraintes sur le couple moteur et la vitesse sont respectées. Les rapports de boîte calculés sont numérotés de 1 à 5. On remarque sur la figure 3.6 que le régime moteur reste dans la zone définie précédemment.

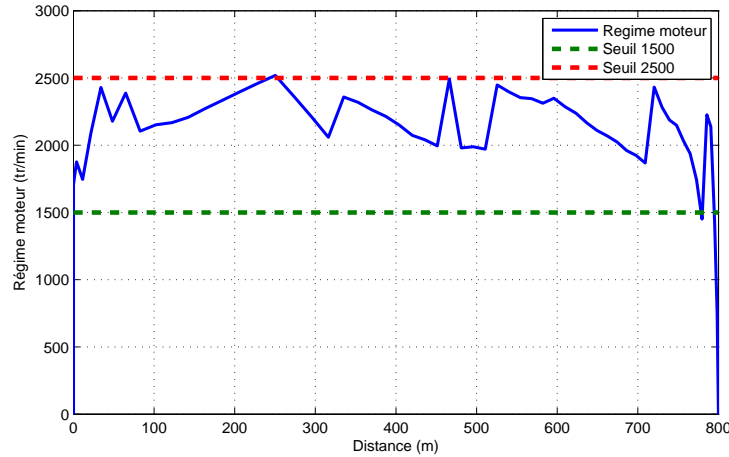


FIG. 3.6: Régime moteur obtenu avec l'algorithme SQP

Comme on l'a souligné, les solutions obtenues avec la programmation quadratique successive peuvent être potentiellement des solutions locales et que cette méthode est sensible aux conditions d'initialisation. En effet, comme on ne connaît pas à priori la trajectoire optimale sur un tel

trajet, un processus aléatoire est utilisé pour initialiser cet algorithme. Avec cela, on voit qu'en fonction de l'initialisation, on obtient des profils différents (figure 3.7). Cette différence peut être acceptable dans le cas des profils 1 et 2 mais deviennent très importantes pour le cas du profil 3.

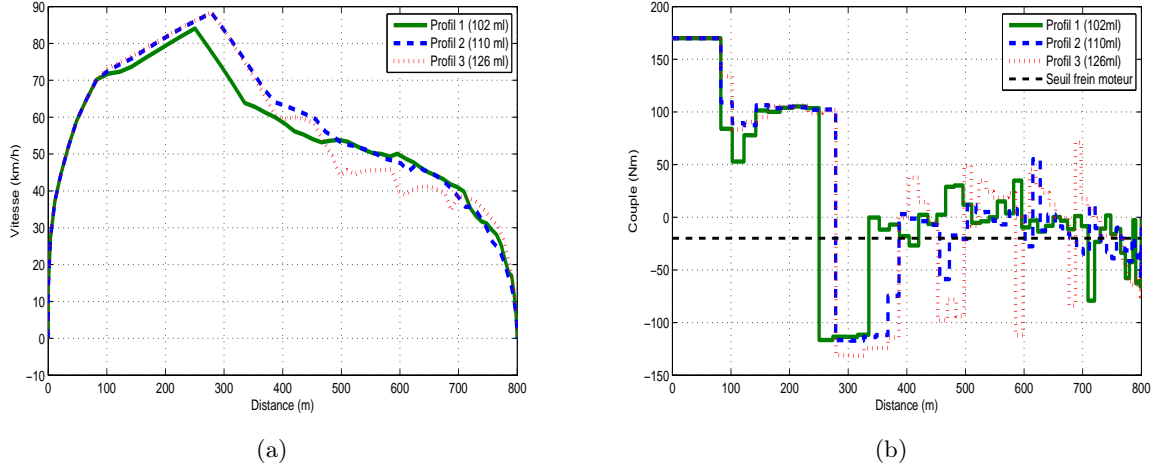


FIG. 3.7: Effets d'initialisation de l'algorithme SQP

Pour alléger les figures, on présente uniquement les couples et les vitesses optimaux. Le profil 1 correspond à une consommation de carburant la plus faible de 51 ml, suivi par le profil 2 (55 ml) et le profil 3 (63 ml). La différence en terme de consommation de carburant entre ces trois profils est tout de même remarquable. Entre le profil 1 et le profil 3, on observe une différence de 23.5%. Cette différence peut s'expliquer par des vitesses atteintes plus élevées et par un pourcentage de temps d'utilisation du frein moteur moins important pour les deux derniers profils. Dans ces trois cas, même si la consommation nous pose déjà le problème, les solutions se ressemblent plus ou moins. Mais il existe des cas où la solution donnée par l'algorithme SQP est complètement différente comme le montre la figure 3.8

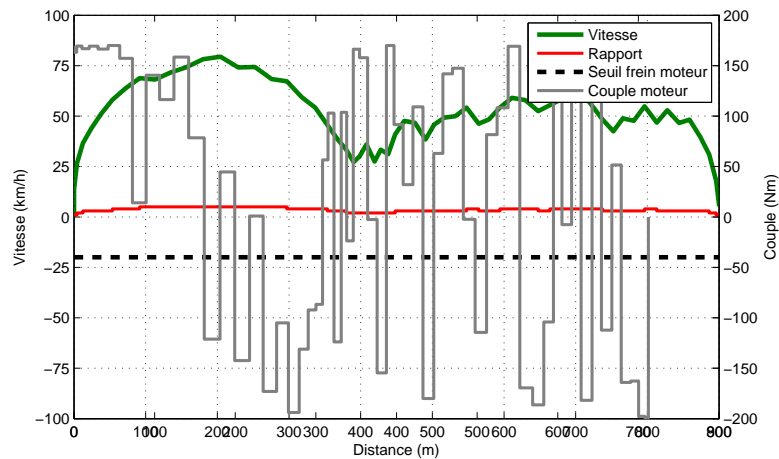


FIG. 3.8: Profils optimaux obtenus avec l'algorithme SQP - cas défavorable

La consommation de carburant correspondant à ces profils est de 91 ml, soit 78% de plus

par rapport au profil 1. En plus, on observe bien le problème d'oscillation sur la vitesse et sur le couple. Ce problème est donc très gênant pour le confort du passager.

On continue dans le paragraphe qui suit à présenter l'application de la programmation dynamique pour ce même problème avant d'analyser les avantages et les inconvénients de chacune de ces deux méthodes.

3.3.4 Application de la programmation dynamique

La résolution numérique de notre problème ressemble à la recherche du plus court chemin pour ramener le système de l'état initial vers l'état final ou les états finaux, au moyen de la programmation dynamique. En effet, grâce à la connaissance à priori de la géométrie de la route, l'évolution de notre système est déterministe. La transition entre des états successifs est associée à un coût qui est la valeur de notre fonction objective. La résolution via l'équation BHJ de notre problème est faite avec la formulation suivante.

Le trajet est discrétisé en $N+1$ étapes. e_n^i correspond à l'état i à l'étape n . L'ensemble E_n des états e_n^i à l'étape n est défini par l'espace discrétisé du vecteur d'états. A chaque transition de l'état $e_n^i \in E_n$ à l'état $e_{n+1}^j \in E_{n+1}$ on associe un coût $\zeta_{n+1}^{i,j}$. A chaque état e_n^i , on associe un coût J_n^i . Un coût $J_n^i = \infty$ indique que l'état i de l'étape n ne peut pas être atteint par n'importe quel autre état de l'étape $n-1$. Ainsi ce coût permet de définir l'ensemble des états admissibles E_n^{adm} d'une étape n donnée. On a par exemple $E_N^{adm} = \{e_N^t\}$ pour l'état final n .

Dans un premier temps, le trajet est discrétisé en temps. Le vecteur d'état comporte donc deux variables qui sont la vitesse et la distance. Le couple moteur n'est pas discrétisé mais calculé à partir des équations de mouvement du véhicule.

La figure 3.9 représente la formulation du problème présentée ci-dessus.

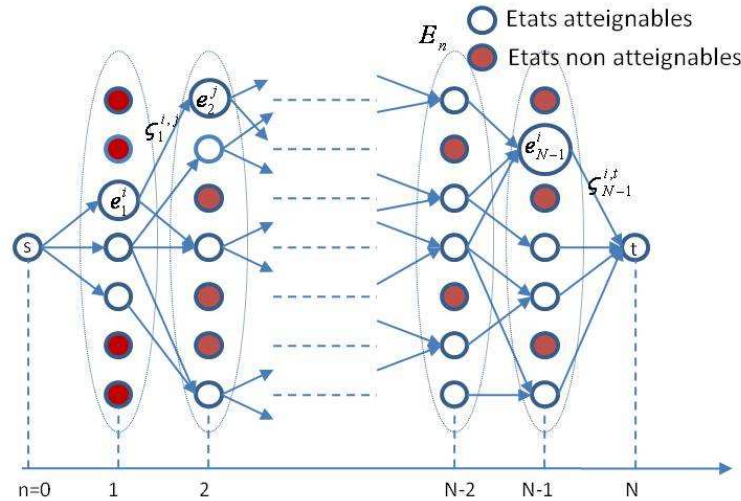


FIG. 3.9: Formalisation du problème optimal avec la théorie des graphes

L'algorithme recherche la commande optimale en fonction de l'état sur $N+1$ étapes et correspond à notre formulation, décrit comme suit.

1. pour $n=0, \dots, N$
 $J_n^i = \infty, i \in E_n$
 $J_N^t = 0$
2. $n=N$
3. Pour chaque $e_n^j \in E_n^{adm}$
 $J_{n-1}^i = \min_{j \in E_n} \{ \zeta_{n-1}^{i,j} + J_n^j \}, i \in E_{n-1}$
 La transition de l'état e_{n-1}^i à l'état e_n^j est autorisée quand on satisfait les différentes contraintes précisées par 3.13.
4. Répéter l'étape 3 pour $n=N-1, \dots, 1$

La recherche du profil optimal de vitesse à partir de l'état initial est alors effectuée de la même façon que précédemment.

Par la suite, on présente des résultats de simulations obtenus par la programmation dynamique.

Résultats de simulation

En utilisant le même contexte utilisé pour l'algorithme SQP, les résultats obtenus avec la Programmation dynamique sont présentés sur la figure 3.10.

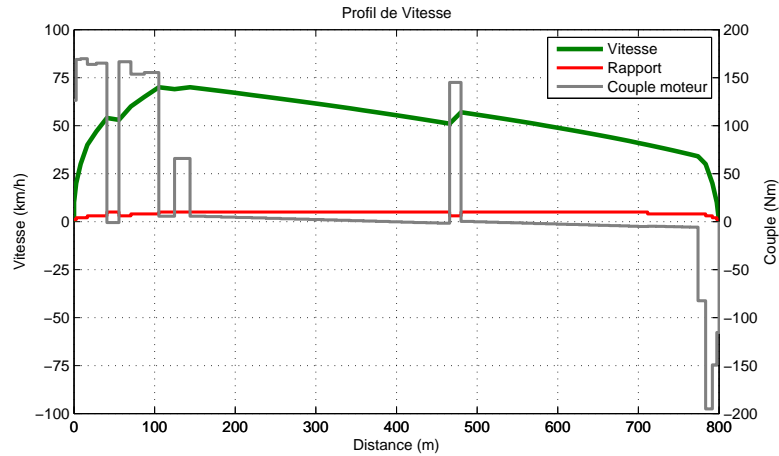


FIG. 3.10: Profils optimaux obtenus avec l'algorithme PD

Les contraintes sur la vitesse et le couple sont respectés, ainsi que les conditions initiales et finales. Le régime moteur reste plus ou moins dans l'intervalle "optimal" comme le montre la figure 3.11

La consommation correspondant à ces profils est de 37.6 ml. Ce qui est beaucoup moins important par rapport aux profils obtenus par la méthode SQP. La comparaison des deux méthodes est l'objet du paragraphe suivant.

3.3.5 Comparaison des deux méthodes

On a présenté ici deux exemples de méthodes qui sont la programmation dynamique et la programmation quadratique successive. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients pour être utilisée dans une application embarquée.

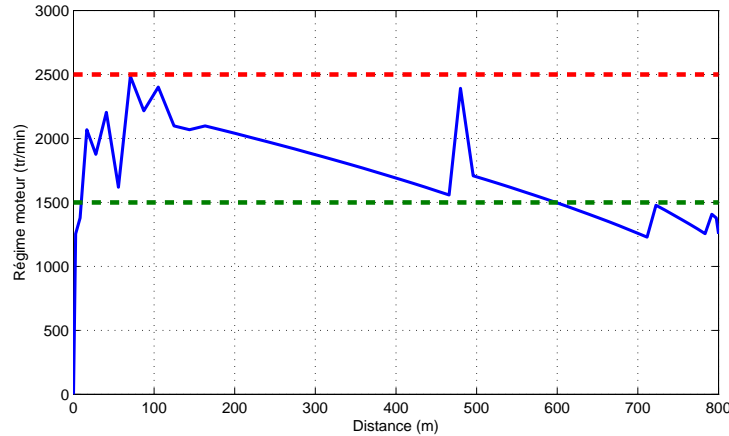


FIG. 3.11: Régime moteur obtenu avec l'algorithme PD

Avant tout, la méthode SQP est une méthode d'optimisation indirecte. Elle montre à travers les résultats précédents qu'elle est très sensible au choix de la condition initiale et par conséquent demande une connaissance à priori de la trajectoire optimale. Ce qui n'est évidemment pas faisable dans le cadre de notre application. De plus, la prise en compte des contraintes n'est pas forcément facile à faire. Car dans ce cas, on augmente la dimension de l'espace d'état et donc on augmente la complexité du problème. Le problème d'optimum local est aussi à souligner en utilisant la programmation quadratique successive.

Pour ce qui est de la programmation dynamique, elle ne demande pas une formulation très rigoureuse du problème et la prise en compte des différentes contraintes est très facile à réaliser à chaque étape de calcul. De plus, avec l'utilisation de l'équation de Halminton-Bellman-Jacobi, on a une condition nécessaire et suffisante pour assurer l'obtention d'une solution optimale globale.

Si on compare les résultats obtenus avec les algorithmes SQP et PD, on trouve que l'algorithme PD donne une meilleure solution. Les figures 3.12 et 3.13 nous permettent de justifier cela. En comparant les deux courbes de vitesse, la vitesse maximale du profil PD est plus faible que celle du profil SQP, le pourcentage d'utilisation du frein moteur est plus important et par conséquent on obtient une consommation totale moins élevée.

Dans le cas de l'algorithme SQP, la routine `fmincon` [Mat06] de la Toolbox Matlab est utilisée. Notons qu'il existe plusieurs autres solveurs fondés sur l'algorithme SQP permettant de résoudre le problème posé qui fait partie des problèmes de programmation non linéaire (NLP). On retrouve alors les travaux des chercheurs de l'université de Californie, San Diego et de l'Université de Stanford avec notamment les trois solveurs appelés SNOPT [GMS06], NPSOL [GMS98] et MINOS [MS83]. Nous ne les avons pas utilisés en raison de leur coût. On peut aussi retrouver d'autres solveurs moins utilisés comme `filterSQP`, `OPTIMA`,... La majorité de ces solveurs est implantée sous forme d'une librairie codée en Fortran. On souhaite alors plutôt utiliser une routine que l'on sera capable de mieux maîtriser.

Pour le scénario étudié, on a choisi un pas de discrétisation de 1 seconde. Les paramètres par défaut de la routine sont utilisés. On remarque que le temps de calcul dépend de l'étape d'initialisation. Il peut être de l'ordre d'une dizaine de secondes à une ou deux minutes sur un ordinateur double cœur cadencé à 2 GHz. Ce temps d'exécution varie aussi en fonction des paramètres de résolution : le nombre maximal d'itérations, la tolérance de la solution obtenue,...

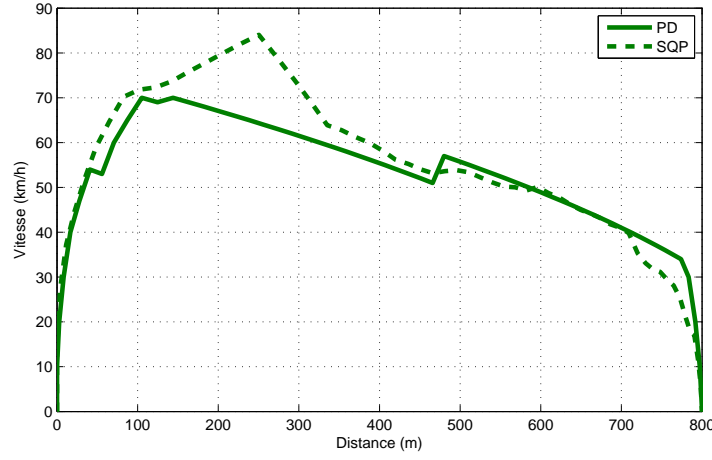


FIG. 3.12: Comparaison des profils de vitesses optimaux obtenus avec l'algorithme SQP et PD

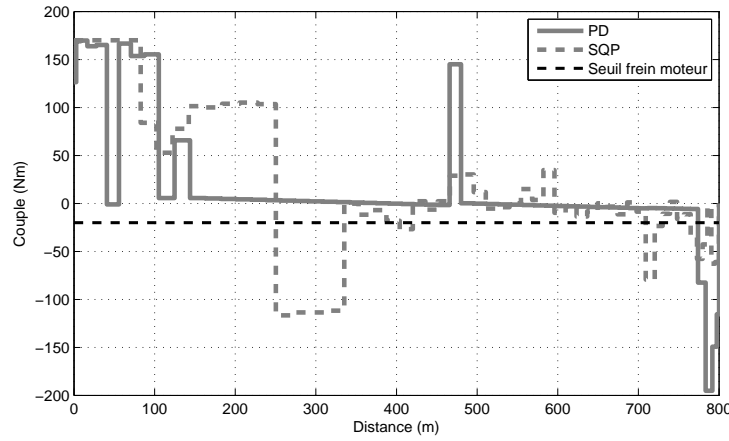


FIG. 3.13: Comparaison des profils de couples optimaux obtenus avec les algorithmes SQP et PD

On n'est donc pas en mesure d'évaluer de façon précise le temps d'exécution de l'algorithme SQP.

Pour ce qui est de la programmation dynamique, le temps de calcul représente son plus gros inconvénient. Le paragraphe §4.2.1 présente une étude simple permettant d'évaluer ce temps. Pour le scénario étudié, le pas de discrétisation du temps est toujours de 1 seconde. Les variables d'états sont aussi discrétisées. Le temps d'exécution pour ce simple scénario s'avère déjà prohibitif et est de l'ordre d'une quinzaine d'heures sur le même ordinateur. Dans ce même paragraphe, nous allons aussi montrer que ce temps varie de façon exponentielle en fonction de la dimension de l'espace d'état.

3.4 Conclusions

Dans cette section, on a présenté un problème d'optimisation de consommation simple avec des hypothèses et des stratégies simplificatrices. Cette approche nous permet d'étudier la méthodologie à utiliser pour construire notre système final. Deux méthodes d'optimisation sont testées

et pour chacune d'elles les inconvénients et avantages ont été mis en évidence. On obtient un profil plus économique avec la programmation dynamique mais le temps de calcul nécessité par la résolution de ce problème est très élevé. De son côté, la programmation quadratique successive présente des inconvénients très majeurs pour une application comme la nôtre (temps de calcul variable, optimum local, capacité à deviner la trajectoire optimale nécessaire). De plus, l'implémentation de cet algorithme s'avère plus difficile, surtout dans le cas d'un problème à caractère hybride. C'est pour cela, la programmation dynamique est choisie pour la suite de notre étude. Le grand défi est maintenant de réduire le temps de calcul et d'adapter cet algorithme à un problème plus complet et complexe.

Le chapitre suivant détaille tous ces aspects nécessaire à la construction du système final.

Chapitre 4

Vers un système d'aide à la conduite écologique et sécuritaire

Sommaire

4.1	Problème d'optimisation multi-objectifs	78
4.1.1	Nouvelle approche du problème	78
4.1.2	Recherche d'une nouvelle fonction coût	79
4.1.3	Influence de la pente	87
4.1.4	Conclusion	90
4.2	Approche pour un calcul en ligne	94
4.2.1	Analyse de la complexité de la programmation dynamique	94
4.2.2	Changement de méthode de discrétisation	95
4.2.3	Utilisation de l'horizon électronique	96
4.2.4	Réduction de l'espace de recherche	97
4.2.5	Conclusion	98
4.3	Extension au problème de sécurité	98
4.3.1	Définition du contexte de sécurité	99
4.3.2	Choix de la stratégie	102
4.3.3	Contrôleur de logique floue	103
4.4	Validation de la stratégie développée : cas d'un système actif	108
4.4.1	Conception d'un système actif	108
4.4.2	Résultats de simulation	111
4.5	Conclusion	113

L'objectif principal consiste à concevoir un système capable de communiquer au conducteur l'impact de son comportement au volant sur la consommation de carburant et de lui suggérer un style de conduite plus économique et écologique. Signalons que les consignes données doivent être cohérentes avec sa situation de conduite, notamment en terme de sécurité. L'approche utilisée au chapitre précédent est insuffisante pour atteindre ces objectifs. C'est donc pour cela qu'une nouvelle approche du problème est mise en place. Le problème d'optimisation non-linéaire et hybride défini par les équations (3.16) est abordé sous l'angle d'un problème multi-objectifs par la construction d'une nouvelle fonction de coût. Ceci nous permet d'étudier, sur un exemple simple, le compromis entre le temps de trajet, la consommation de carburant et le confort du passager. L'influence de la pente est aussi abordée. Par la suite, les différentes techniques visant à réduire l'effort de calcul lié à la Programmation Dynamique la rendent utilisable dans une approche

de calcul en ligne. Finalement, les différents aspects du problème de sécurité sont traités. Cela nous permet de transmettre au conducteur des informations et des suggestions à la fois plus précises, plus cohérentes et surtout plus sûres. Cette nouvelle approche [LNM10b, LNM10c] se différenciera alors des concepts existants [Hel10, vdVDvM01].

4.1 Problème d'optimisation multi-objectifs

Le chapitre précédent a traité un problème d'optimisation avec un temps de parcours précis. Par cette formulation, seul le critère de consommation en carburant a été pris en compte. Son plus grand défaut est qu'elle s'avère très gourmande en temps de calcul. Pour le détourner, la première solution consiste alors à transformer le problème dépendant du temps en un problème dépendant de la distance. Le problème devient alors un problème d'optimisation avec un temps de trajet implicite. Cette transformation se réalise grâce à la réécriture suivante :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt} \Rightarrow \frac{dv}{ds} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dt} \quad (4.1)$$

avec l'hypothèse d'une vitesse non nulle.

Par conséquent, la nouvelle expression du mouvement longitudinal s'écrit :

$$f(X_n, U_n) = \begin{cases} x_n + \Delta x \\ v_n + \frac{\Delta x}{v_n} * \frac{r}{Mr^2 + I_{et}N_f^2N_t^2(rb_n) + I_{dw}}(\eta N_f N_t (rb_n) T_{ebn} \\ -r(MgC_R + \frac{1}{2}\rho SC_x v_n^2 + Mgsin\theta_n)) \end{cases} \quad (4.2)$$

où Δx est le pas de discrétisation en distance.

La démarche, pour formuler de nouveau le problème d'optimisation, reste identique à la précédente, s'agissant de la définition du critère, des contraintes,... Mais à présent, certaines hypothèses seront levées. La discrétisation du problème n'est alors plus la même.

4.1.1 Nouvelle approche du problème

Rappelons d'abord quelles sont les hypothèses utilisées dans le chapitre précédent. Premièrement, certaines contraintes, notamment le jerk, ne sont pas prises en compte. Ce choix a été fait dans le but d'obtenir un problème suffisamment simple pour examiner rapidement les différentes méthodes d'optimisation. Le regroupement du couple moteur et de freinage a été une solution intéressante pour réduire la dimension du problème et donc l'effort de calcul de la Programmation Dynamique. Puis, finalement, l'hypothèse la plus importante reste l'utilisation d'un modèle du rapport de boîte. Dans ce cas, on considère que le véhicule dispose d'une boîte de vitesse automatique et que l'on s'occupe uniquement de trouver le couple et la vitesse optimaux. Le caractère hybride du problème initial disparaît alors. Cela simplifie forcément la résolution du problème. Bien que cette approche reste cohérente dans notre contexte d'étude, son plus grand inconvénient est qu'elle ne présente pas une démarche générique et introduit certaines imprécisions. En effet, les seuils de changement de rapport, par exemple, peuvent être différents d'un véhicule à l'autre. Le maintien du régime moteur dans une zone dite "optimale" n'est pas forcément la stratégie la mieux adaptée à toutes les situations et à tous les types de véhicules, notamment les véhicules lourds. Il est nécessaire de résoudre le problème initial sans perdre de vue les points qui le caractérisent. Cela est tout à fait faisable avec la programmation dynamique. En plus de ses

avantages déjà soulignés, sa mise en œuvre facile rend la prise en compte des contraintes et du caractère hybride du problème plus simple. Rappelons alors la formulation du problème initial :

$$\begin{cases} \min_{U^*} J(U, X) \\ \dot{X} = f(X, U, \theta) \\ H_i(X) = 0, \quad i = 1, \dots, p \\ G_j(X, U) \leq 0, \quad j = 1, \dots, q \\ rb \in Rb \end{cases} \quad (4.3)$$

avec $X = \begin{pmatrix} x \\ v \end{pmatrix}$ le vecteur d'état et $U = \begin{pmatrix} T_e \\ T_b \\ rb \end{pmatrix}$ le vecteur de commande.

Le regroupement du couple moteur et de freinage est toujours utilisé. Le problème sous forme discrète s'écrit alors :

$$\begin{cases} \min_{U_0, \dots, U_{N-1}} J \\ X_{n+1} = f(X_n, U_n, \theta_n) \\ H_i = 0, \quad i = 1..p \\ G_j \leq 0, \quad j = 1..q \\ rb \in Rb \end{cases} \quad (4.4)$$

On a, comme variable d'état à l'étape n , $X_n = \begin{pmatrix} v_n \end{pmatrix}$ et comme variables de contrôles $U_n = \begin{pmatrix} T_{ebn} \\ rb_n \end{pmatrix}$.

Par cette formulation, la discrétisation du problème change. Le trajet est discrétisé en distance alors qu'il l'était en temps. Le nombre des états e_n^i , toujours défini par deux espaces discrétisés, est fortement réduit. Le deuxième espace discrétisé est réduit à N_x pour le nombre de valeurs discrètes de la distance, et à 5 pour le nombre de valeurs possibles du rapport de boîte de vitesse. Il faut souligner que même si on a 5 valeurs discrètes du rapport de boîte, seules trois valeurs sont admissibles à chaque pas de calcul pour rester dans la logique séquentielle d'une boîte de vitesse manuelle.

Construisons maintenant la fonction coût qui nous permet d'introduire différents aspects de la conduite.

4.1.2 Recherche d'une nouvelle fonction coût

Sur un trajet donné, plusieurs objectifs peuvent être définis. Le premier consiste à parcourir le trajet en un temps minimal. Dans ce cas, on utilise le maximum de la capacité (couple moteur maximal et accélération maximale) du véhicule pour atteindre le plus rapidement possible la fin du parcours. Par conséquent, on a le plus court temps de trajet mais aussi la plus grande quantité de carburant consommée. La deuxième stratégie consiste alors à rouler moins vite pour consommer moins en dépit d'un temps de trajet plus élevé. Dans cette partie, on essaie de traduire ces comportements à travers différents critères utilisés pour former la fonction coût du problème d'optimisation. La construction de cette fonction nous permettra de mettre en évidence la différence entre une conduite sportive, énergivore et une conduite plus douce, plus sûre et écologique. En d'autres termes, nous allons analyser le compromis entre la consommation, le temps de trajet et le confort du passager.

Pour cela, on a à résoudre un problème multi-objectifs avec notamment la construction de différents critères représentatifs des différents aspects que l'on souhaite considérer. Une des méthodes pour aborder ce problème consiste à n'en former qu'un seul à partir de ces différents

critères. La forme générale en est alors une somme pondérée qui s'écrit :

$$J = \sum Q_i * C_i \quad (4.5)$$

avec C_i , les différents critères et Q_i les coefficients de pondération correspondant à chaque critère C_i , J étant le critère de coût final à optimiser.

Un des points délicats de ce problème se situe dans le choix des poids associés à chaque critère. Il existe une solution optimale pour chaque ensemble des valeurs des coefficients Q_i . La définition de ces valeurs nous permet d'imposer les critères dominants dans la solution recherchée. Un coefficient Q_i important signifie que la priorité du critère C_i associé est plus élevée. Il existe donc non seulement une solution mais plusieurs solutions optimales pour ce problème.

Problème de temps minimal

Le critère à considérer dans ce cas est le temps de trajet. Sous forme discrète, il s'écrit :

$$T = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{2 * \Delta x}{v_{n+1} + v_n} \quad (4.6)$$

Le problème consiste alors à minimiser ce temps tout en respectant les contraintes imposées par la performance du véhicule et par la limitation de vitesse. Le cas d'un trajet entre deux arrêts distants de 800 m l'un de l'autre est de nouveau étudié. La pente est considérée nulle. Les profils optimaux, obtenus à l'aide de la programmation dynamique, sont présentés sur la figure 4.1. Sur le profil de la vitesse, on constate trois phases distinctes. La phase d'accélération

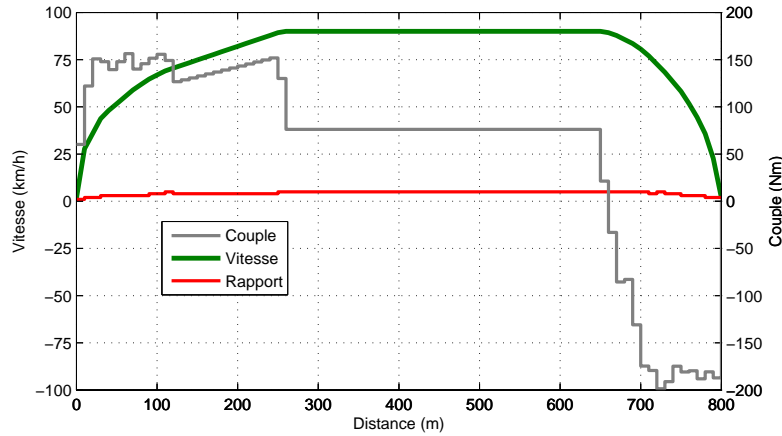


FIG. 4.1: Profils optimaux : cas du temps minimal

à partir d'une position d'arrêt jusqu'à la vitesse maximale autorisée se fait sur 250 m. La phase de croisière à la vitesse de 90 km/h constitue la phase la plus longue. Et finalement, on a la phase de décélération pour revenir à la vitesse nulle à la position d'arrêt. On remarque que la phase d'accélération est la phase dans laquelle le couple moteur est le plus sollicité. À l'inverse, la phase de décélération utilise le maximum de capacité de freinage pour décélérer. Ce comportement est tout à fait cohérent par rapport à l'objectif fixé : le plus court temps de parcours.

Ces profils montrent aussi que les différentes contraintes liées à la vitesse, au couple, au rapport de boîte aussi qu'aux conditions initiales et finales sont respectées. Nous avons la même

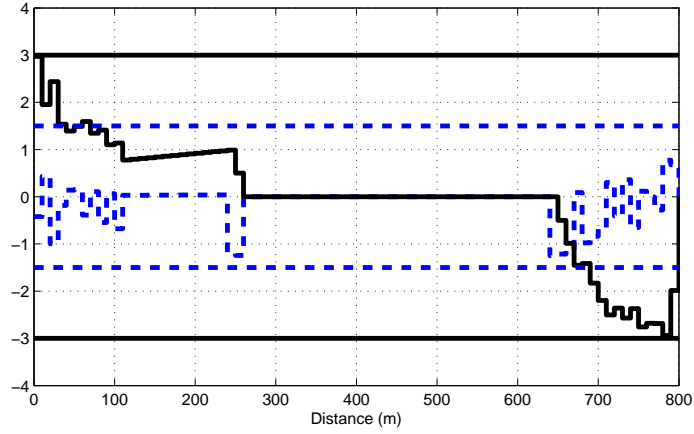


FIG. 4.2: Accélération en m/s^2 (en noir) et Jerk en m/s^3 (en bleu) du véhicule avec leurs contraintes (lignes horizontales en pointillées) : cas du temps minimal

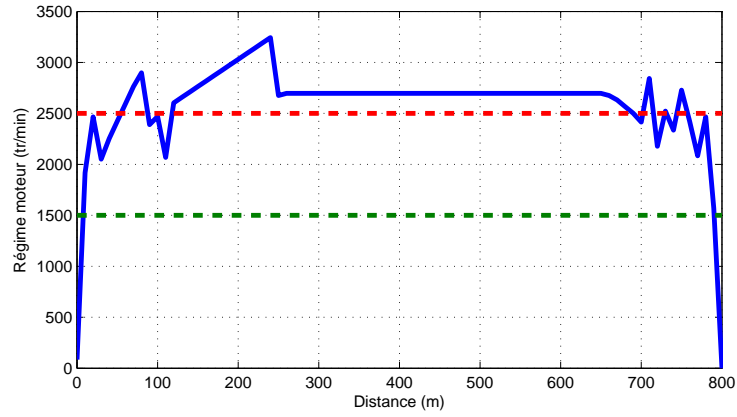


FIG. 4.3: Régime moteur : cas du temps minimal

remarque en regardant les courbes d'accélération, du jerk (figure 4.2) et du régime moteur (figure 4.3).

Sur la figure 4.3, les deux lignes en pointillés définissent la zone "optimale" du régime moteur, utilisée précédemment pour définir le modèle de boîte de vitesse. Dans ce cas, le régime moteur ne se trouve pas dans cette zone. Cela semble cohérent car on ne recherche pas à minimiser la consommation de carburant mais à obtenir le plus court temps de trajet. C'est d'ailleurs le défaut de l'approche avec le modèle du rapport de boîte de vitesse utilisé. En souhaitant maintenir le régime moteur dans une zone optimale, on force l'utilisation de rapports inadéquats à l'objectif fixé. La comparaison des profils obtenus par les deux approches (figure 4.4) met en évidence ce problème.

Pour cette comparaison, la notation étoilée est utilisée pour indiquer les profils obtenus par l'utilisation du modèle de rapport de boîte. Sur cette figure, la courbe vitesse* correspondant à l'utilisation du modèle de rapport de boîte, possède la phase d'accélération la plus longue. Cela s'explique par les rapports utilisés. Le fait de limiter le régime moteur oblige l'utilisation des rapports supérieurs avec une capacité d'accélération moins importante. Le temps nécessaire

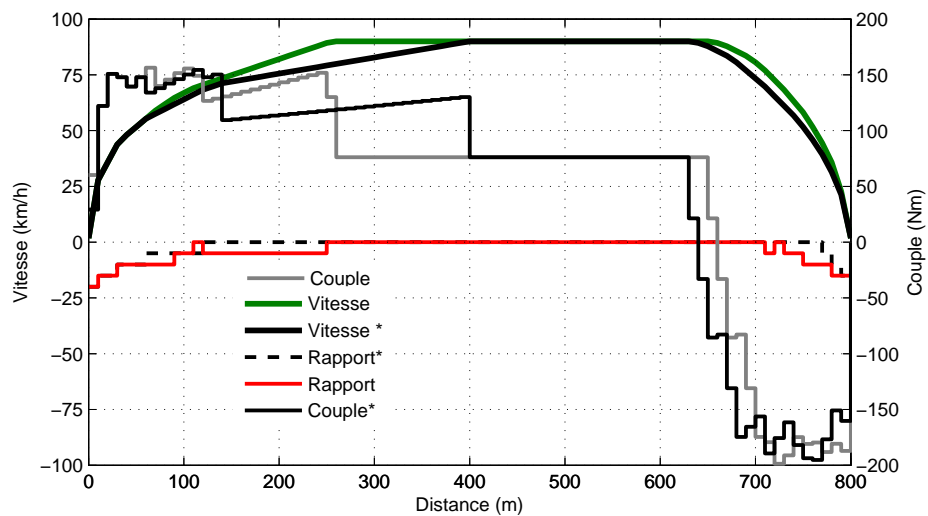


FIG. 4.4: Problème en temps minimal : comparaison des deux approches au niveau du rapport de boîte

pour atteindre la vitesse maximale est le plus long. Avec la nouvelle approche, les premiers rapports sont préconisés pour la phase de démarrage. Ce choix offre une capacité d'accélération plus importante. Le véhicule peut atteindre plus rapidement la vitesse maximale. Par conséquent, le régime moteur en est accru (figure 4.5).

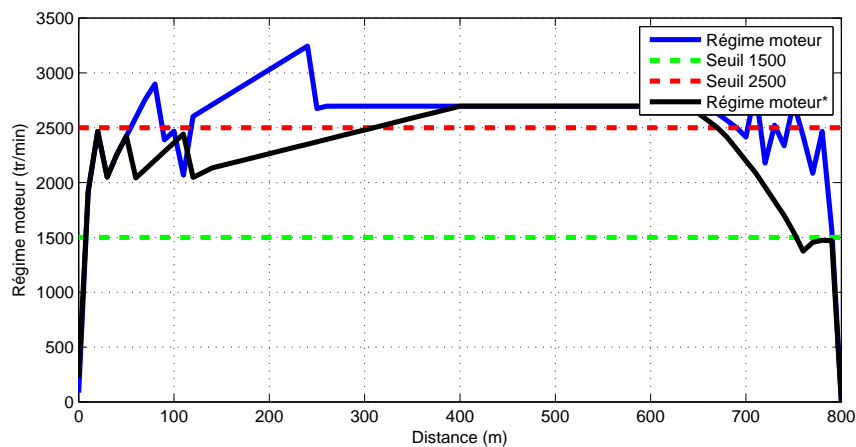


FIG. 4.5: Problème en temps minimal : comparaison, des régimes moteur, des deux approches du rapport de boîte

La vitesse maximale atteinte plus rapidement et son maintien plus long diminuent le temps de trajet (on passe de 45 s à 43 s), mais augmentent légèrement la consommation (de 86 ml à 88 ml).

Le problème en temps minimal est maintenant abordé avec la vérification du respect des différentes contraintes. La comparaison entre deux approches pour le rapport de boîte nous fournit déjà quelques informations intéressantes, notamment la relation entre le temps de trajet et la consommation. Examinons ce problème de plus près.

Compromis entre le temps de trajet et la consommation

Il est évident que les profils correspondant au problème en temps minimal sont les plus énergivores. Ce ne sont pas ceux qui nous intéressent le plus pour la conception du système. Une conduite écologique doit correspondre à un temps de trajet convenable et une consommation en carburant en baisse. Pour obtenir ce type de profil, cette dernière doit être prise en compte. Le nouveau critère de coût est alors défini comme :

$$J = Q_1 * FC + Q_2 * T \quad (4.7)$$

avec Q_1 (en ml^{-1}), Q_2 (en s^{-1}), les coefficients de pondération respectivement associés aux critères de consommation et de temps.

On remarque que ces deux critères ont le même ordre de grandeur. Cela signifie que les poids des coefficients sont directement représentatifs du niveau de priorité du critère dans la fonction coût. On fixe le coefficient $Q_2 = 1$. Le problème en temps minimal correspond au cas où le coefficient Q_1 est égal à zéro. On souhaite réduire la consommation tout en garantissant un temps de trajet correct. Cela est important pour que les consignes données soient acceptées par le conducteur. Dans un premier temps, on fixe le coefficient $Q_2 = 0.5$. Ce choix correspond, en principe, à un temps de trajet de plus de 33% par rapport au temps minimal. On souhaite observer le gain en consommation correspondant.

Les résultats de simulation montrent qu'avec des coefficients ainsi définis, on constate une augmentation du temps de trajet de 23.26%. Mais la quantité de carburant consommée diminue de 31.8%. Nous allons analyser les profils optimaux obtenus avec ce jeu de coefficients pour donner quelques explications. Sur la figure 4.6, les profils optimaux de la vitesse, du couple moteur et du rapport de boîte sont présentés.

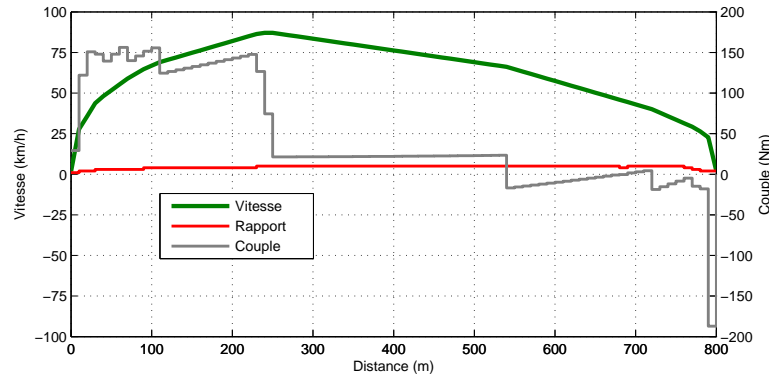


FIG. 4.6: Profils optimaux : $Q_1=0.5$ $Q_2=1$

Ces profils comportent une phase d'accélération et une phase de décélération. La vitesse maximale (90 km/h) n'est pas atteinte. Les sollicitations du couple les plus importantes se trouvent dans la phase d'accélération. Pour le reste, le couple requis reste faible. En les comparant aux profils en temps minimal (figure 4.7), les différences se font clairement identifier.

La vitesse moyenne du nouveau profil est plus basse. Ce qui implique un temps de trajet plus élevé. Le couple moteur est moins sollicité et on voit apparaître l'utilisation du frein moteur. De plus, le régime moteur (figure 4.8) est plus faible. Cela explique le gain d'économie en carburant obtenu.

Ces simulations montrent qu'il existe un compromis entre le temps de trajet et la consommation qu'il faudra trouver. Si on se place alors dans la situation où le conducteur accepte un

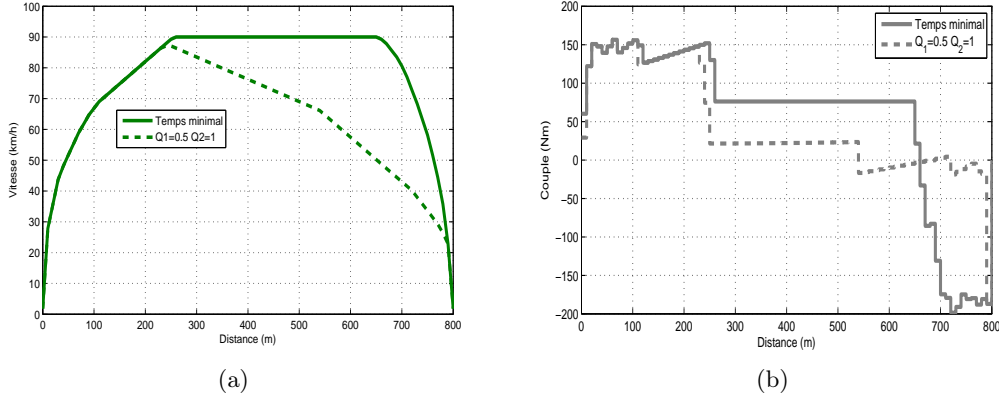


FIG. 4.7: Compromis entre le temps de trajet et la consommation : comparaison des profils optimaux - (a) profils de vitesse (b) profils de couple

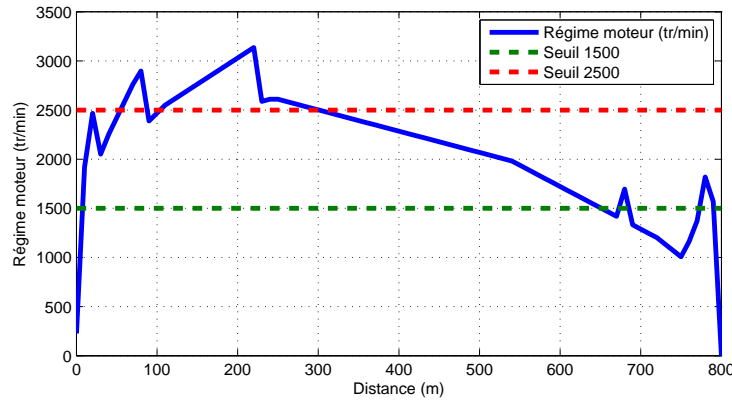


FIG. 4.8: Régime moteur : $Q_1=0.5$ $Q_2=1$

temps de trajet entre 0 à 20% de plus que le temps minimal, cette économie est alors un argument intéressant pour convaincre le conducteur à suivre les consignes données par le système ainsi conçu. Mais la décélération sur une longue distance n'est peut-être pas du goût de tout le monde. Dans ce cas, il faut proposer un profil plus rapide mais toujours avec un gain d'économie en carburant.

Pour cela, prenons un coefficient $Q_1 = 0.1$. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.1.

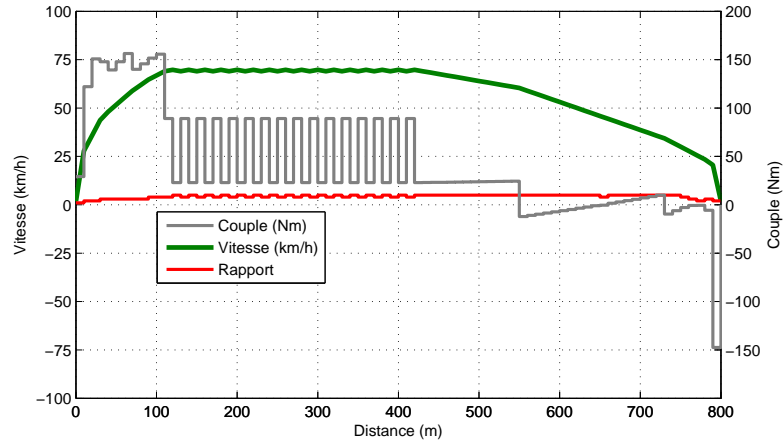
Avec ce choix, la diminution du temps de trajet est moins importante mais le gain en carburant reste significatif. En acceptant une augmentation du temps de trajet de 2.3%, ce qui équivaut un retard de 30 secondes sur un trajet de 30 minutes, le gain potentiel en carburant est de 11%, qui n'est pas du tout négligeable.

A l'inverse, si on souhaite avoir une plus forte réduction de carburant, il faut augmenter le poids du coefficient qui lui est lié. Fixons par exemple le coefficient $Q_1 = 1$. Dans ce cas, on s'attend à une forte réduction de la consommation de carburant et un temps de trajet plus conséquent. Effectivement, le temps qu'il faut pour parcourir une distance de 800 m en suivant

TAB. 4.1: Compromis entre le temps de trajet et la consommation de carburant

Profil	Coefficients	Temps (s)	Consommation (ml)
1	$Q_1=0.0, Q_2=1$	43 (+0.0%)	88 (-0.0%)
2	$Q_1=0.1, Q_2=1$	44 (+2.3%)	78.3 (-11.08%)
3	$Q_1=0.5, Q_2=1$	53 (+23.26%)	60 (-31.8%)

le profil de vitesse de la figure 4.9 est maintenant de 58 secondes, soit une augmentation de 34% avec une consommation de 57.5 ml.

FIG. 4.9: Profils optimaux : $Q_1 = 0.5$ $Q_2 = 1$

La vitesse maximale atteinte et la vitesse moyenne de ce scénario sont plus basses. Cela explique le temps de parcours plus long par rapport aux cas précédents mais le point qui nous intéresse le plus avec ce profil reste son comportement sur l'intervalle [100m ; 400m]. On voit apparaître des oscillations sur le profil de vitesse. Le comportement constaté fait qu'il y a une longue phase d'accélération suivie d'une phase de décélération. Le phénomène se répète jusqu'à la phase de décélération pour atteindre le point d'arrêt. En effet, en choisissant un coefficient Q_1 plus élevé, on accepte un temps de parcours plus long. Pour moins consommer, on laisse le véhicule avancer avec sa propre inertie ou juste avec un couple moteur faible. Il faut alors redonner un coup d'accélérateur pour diminuer le temps de trajet qui a tendance à augmenter. Plus on augmente le coefficient Q_1 , plus ce phénomène s'amplifie avec des phases de décélération plus longues et des pics d'accélération plus forts. Même si cette solution offre un gain en carburant important, le confort du passager se dégrade d'autant. Si on regarde les courbes de l'accélération et du jerk (figure 4.10), on constate des à-coups très fréquents, donc désagréables pour le conducteur.

Ce cas soulève alors un point intéressant. La réduction de la consommation ne doit pas nuire au confort du passager si l'on veut que le système ainsi conçu soit accepté par le conducteur. Ainsi, concrètement, le phénomène d'oscillation apparu ci-dessus doit être atténué. Un critère représentant le confort du passager doit alors être pris en compte.

Critère pour une conduite "confortable"

En imposant des contraintes sur le jerk, on entend limiter l'amplitude des à-coups. Mais comme on a pu le voir, cela est insuffisant pour éviter le problème d'oscillation, signalé sur la

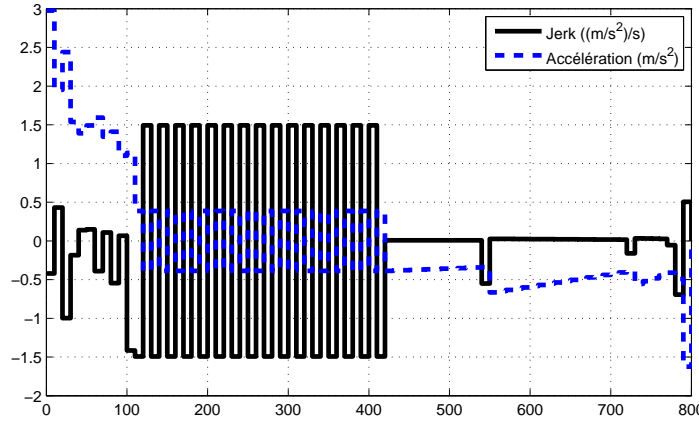


FIG. 4.10: Accélération (en bleu pointillé) et Jerk (en noir solide) : $Q_1=0.5$ $Q_2=1$

figure 4.9. L'introduction d'un nouveau critère pour réduire ce phénomène est nécessaire. Pour que le conducteur n'ait pas la sensation d'être secoué constamment, il faut rouler à une vitesse constante. Le critère de confort se traduit alors par la pénalisation des changements de vitesse. Moins les changements de vitesse sont fréquents, meilleur est le confort du passager. On propose alors le critère suivant :

$$CONFORT = A * \max(0, (v_n - v_{n-1})) + (1 - A) * |(\min(0, (v_n - v_{n-1})))| \quad (4.8)$$

avec $A \in [0; 1]$. On distingue le changement dû à une accélération et le changement dû à une décélération. Cela permet de diminuer le phénomène d'oscillation sans trop pénaliser l'accélération du véhicule. La fonction coût comporte maintenant de trois termes :

$$J = Q_1 * FC + Q_2 * T + Q_3 * CONFORT \quad (4.9)$$

L'ajout de ce nouveau critère favorise une conduite à vitesse constante donc plus confortable pour le conducteur. En même temps, il ajoute un contre-poids pour réduire l'impact du terme lié à la consommation. Il supprime par conséquent le problème d'oscillation sur la vitesse et sur le couple moteur (figure 4.11).

Avec un coefficient suffisamment petit, on a pu rendre le profil de vitesse plus confortable pour le conducteur sans trop modifier le temps de trajet et la consommation ((57.7 ml, 57.46 s) pour la nouvelle fonction coût contre (57.5 ml, 58 s) pour la précédente). Les à-coups sont moins intenses et beaucoup moins fréquents. Dans le cas où il n'y a pas d'oscillation ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$), le nouveau critère permet d'avoir une vitesse constante pendant un intervalle plus long, ce qui engendre, à priori, plus de confort (figure 4.12).

Finalement, il faut quand-même souligner qu'une vitesse constante est un facteur confort mais pas forcément toujours économique, notamment sur une route non plane. Il faut alors trouver le bon rapport entre le confort et la consommation. Ce qui signifie qu'il ne faut pas maintenir à tout prix une vitesse constante avec un coefficient Q_3 élevé.

Conclusion

Dans cette section, on a défini une nouvelle fonction coût. Elle contient à la fois des critères liés à la consommation en carburant, au temps de trajet ainsi qu'au confort du passager. Une

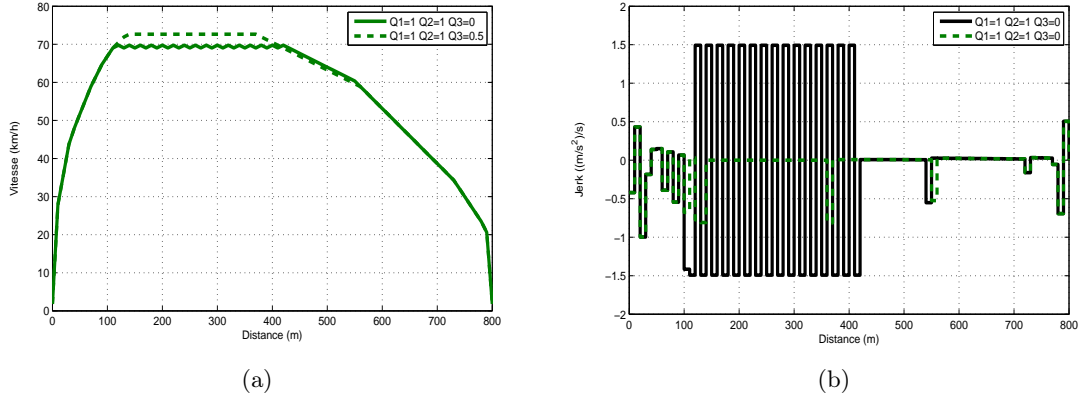


FIG. 4.11: Influence du critère CONFORT sur la vitesse (a) et sur le jerk (b)

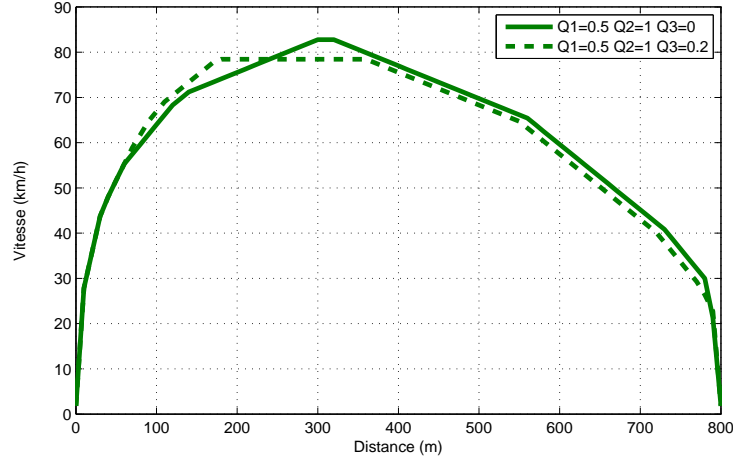


FIG. 4.12: Influence du critère CONFORT sur un profil non oscillatoire

étude sur un exemple simple nous a permis de mettre en évidence l'influence de ces différents critères. Il existe alors non seulement une mais plusieurs solutions optimales. Cela dépend bien évidemment de l'objectif fixé. Sur ces premières simulations, la route est considérée comme plane. Cela a permis de nous focaliser sur la mise au point de la fonction coût. Chaque jeu de coefficients donne des gains en carburant différents. Il est alors intéressant de connaître la part d'influence de la géométrie de la route sur ces gains avec les mêmes coefficients. C'est l'objet de la section suivante.

4.1.3 Influence de la pente

Chacun sait que la pente est un facteur qui a une influence significative sur la consommation du véhicule. La façon de gérer cet élément est une source potentielle de réduction de la consommation. Sur le site du constructeur Renault, les recommandations d'éco-conduite suivantes sont données pour gérer les montées et les descentes :

- Garder sa vitesse en descente

- Ralentir en montée sans gêner la circulation et se stabiliser si possible à une vitesse supérieure à 40 km/h.
- Profiter des descentes pour lever le pied

Étudions maintenant celles obtenues avec notre problème d'optimisation et l'influence de la géométrie de la route sur la consommation en carburant. Le scénario d'un trajet entre deux arrêts est de nouveau utilisé avec des profils de route différents. Deux jeux de coefficients correspondant à des objectifs de réduction de carburant différents sont utilisés.

Le premier scénario consiste à franchir une montée de 200 m avec une inclinaison de 5%. Pour rappel, une montée a une inclinaison positive et une descente une inclinaison négative. Les consignes de couple et de vitesse sont présentées sur la figure 4.13.

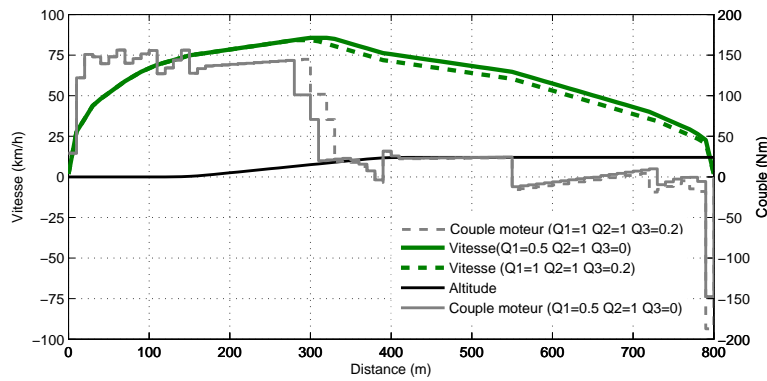


FIG. 4.13: Profils optimaux sur une montée de 5% d'inclinaison : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)

Sur cette simulation, la différence entre ces deux jeux de données n'est pas très importante. Le "bon comportement" consiste à augmenter la vitesse jusqu'à la moitié de la montée et puis ralentir par un faible couple ou par le frein moteur pendant la dernière moitié. Le frein moteur est ensuite utilisé jusqu'à l'arrêt. Les consignes d'éco-conduite ne sont appliquées qu'à la moitié de la côte quand le véhicule a atteint une vitesse suffisamment élevée pour décélérer doucement pendant le reste du trajet. Cette différence montre le caractère local des consignes d'éco-conduite. Ce qui confirme l'intérêt d'un système d'aide à la conduite écologique.

La situation inverse est alors investiguée. Elle consiste à aborder une pente de -5% sur 200 m de distance. La tendance des deux types de profils est de maintenir une vitesse constante sur la descente. Comme dans le cas d'une route plane, une économie plus importante en carburant correspond à une vitesse moyenne plus basse (figure 4.14).

Sur ce cas de descente, on retrouve les mêmes consignes d'éco-conduite mais avec plus de précision.

Sur ces deux exemples, on retrouve donc certaines consignes d'éco-conduite telles que fournies par un constructeur automobile mais avec plus de précision et une approche plus globale. Quant à l'influence des descentes et des montées, le tableau 4.2 nous permet de la quantifier plus clairement.

On constate dans ce tableau que pour le même jeu de coefficients de pondération, les temps de trajet sont sensiblement les mêmes dans les trois cas. La grande différence se situe au niveau de la quantité de carburant consommée. On consomme beaucoup plus en montée qu'en descente. Ce qui est tout à fait naturel. De même, comme sur une route plane, le fait d'aborder une montée ou une descente avec des vitesses différentes peut s'avérer très bénéfique en terme d'économie de

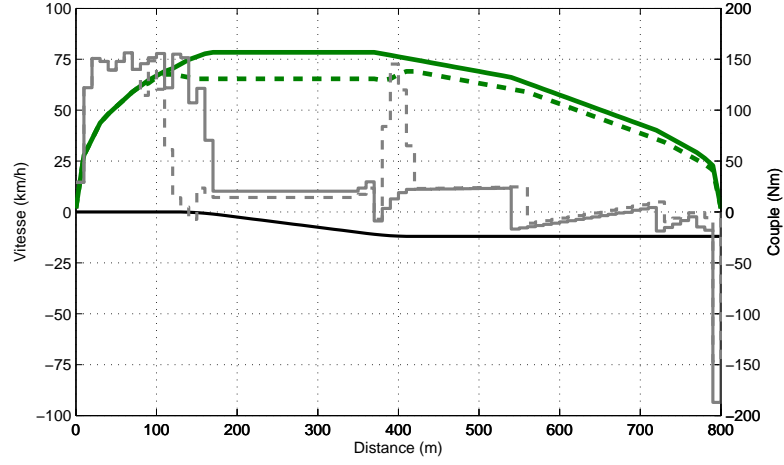


FIG. 4.14: Profil optimaux sur une descente de -5% : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)

TAB. 4.2: Comparaison des consommations sur une montée et une descente par rapport au cas de route plane

Route	Coefficients	Temps (s)	Consommation (ml)
Plane	$Q_1=0.5$ $Q_2=1.0$ $Q_3=0.0$	53.6	60.1
	$Q_1=1.0$ $Q_2=1.0$ $Q_3=0.2$	57.5	57.8
avec une montée de 5%	$Q_1=0.5$ $Q_2=1.0$ $Q_3=0.0$	53.2	72.0
	$Q_1=1.0$ $Q_2=1.0$ $Q_3=0.2$	56.3	70.0
avec une descente de -5%	$Q_1=0.5$ $Q_2=1.0$ $Q_3=0.0$	53.5	47.9
	$Q_1=1.0$ $Q_2=1.0$ $Q_3=0.2$	58.0	44.2

carburant en contre-partie d'une augmentation du temps de trajet. Ces simulations permettent aussi de mettre en évidence certains défauts et imprécisions des consignes d'éco-conduite. Ce qui confirme encore l'intérêt de l'approche proposée. Cela peut être encore prouvé dans des configurations plus complexes, notamment la traversée d'une vallée ou d'une colline.

La figure 4.15 présente le cas d'une vallée avec une descente de -5% suivie par une montée de 5%. Avec les deux jeux de coefficients, on constate le même comportement suivant. Dans un premier temps, on profite de la descente pour maintenir la vitesse. Vers la fin de la descente, on commence à accélérer pour atteindre une vitesse plus élevée avant de profiter de la côte pour décélérer jusqu'à la fin du trajet. En fonction de l'objectif fixé, le comportement précis sur la descente et la montée n'est pas le même. En effet, si on accepte un temps de trajet plus long, ce qui est le cas avec les coefficients $Q_1=1$, $Q_2=1$ et $Q_3=0.2$, on maintient une vitesse constante plus basse tout le long de la descente. Dans le cas contraire, on doit maintenir une vitesse plus haute et profiter plus tôt de la descente pour atteindre une vitesse plus élevée. Ce qui ne permet pas de profiter pleinement de la descente pour réduire la consommation.

Dans le cas d'une colline (figure 4.16), les consignes sont différentes. Après avoir atteint une vitesse suffisamment élevée, on peut profiter de la montée pour décélérer progressivement jusqu'à une vitesse plus basse. On profite par la suite de la descente pour maintenir cette vitesse avant de décélérer à l'aide du frein moteur. Tout cela sans trop solliciter le frein moteur.

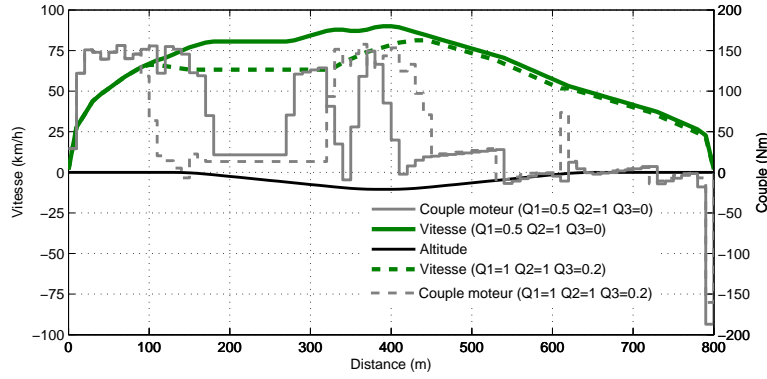


FIG. 4.15: Profils optimaux dans le cas d'une vallée : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)

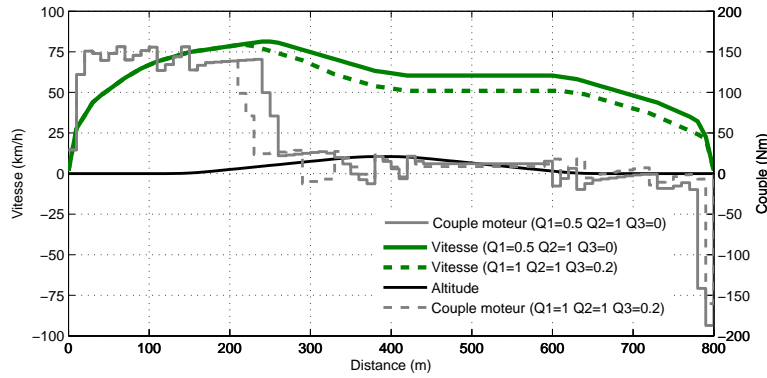


FIG. 4.16: Profils optimaux dans le cas d'une colline : lignes en pointillés ($Q_1=1$ $Q_2=1$ $Q_3=0.2$), traits pleins ($Q_1=0.5$ $Q_2=1$ $Q_3=0$)

À travers ces quatre exemples, l'influence de la pente est mise en évidence. Les consignes d'éco-conduite s'avèrent moins précises par rapport à notre approche. On notera que la connaissance à priori du trajet permet de mieux gérer les descentes et les montées. Certaines vraisemblances entre le style d'éco-conduite classique et notre approche montrent que les profils proposés sont suffisamment proches du comportement d'un conducteur réel mais avec plus de précision et de cohérence.

4.1.4 Conclusion

Dans cette section, le problème d'optimisation non linéaire et hybride est résolu par la programmation dynamique avec le changement de la méthode de discrétisation. Ce changement de méthode de discrétisation nous permet de réduire le temps d'exécution. Ce point sera détaillé dans le paragraphe §4.2.1. Dans le même temps, il transforme notre problème d'optimisation avec un temps de trajet précis en un problème avec un temps de trajet imprécis. La formulation d'un nouveau critère de coût est alors nécessaire pour avoir un temps de trajet convenable et un confort du passager amélioré. On a dû trouver cette nouvelle fonction coût et qui plus est, multi-critères.

A travers les diverses simulations exposées, le compromis entre le temps de trajet, la consom-

mation et le confort du passager est mis en évidence. L'influence de la pente est aussi étudiée. Certaines comparaisons montrent le réalisme et l'avantage de l'approche proposée. On remarque que les simulations sont faites sur un court trajet. Ce choix est motivé par les raisons suivantes. Le type de trajet tout en étant simple représente tout de même les trois phases représentatives d'une conduite normale : la phase d'accélération, la phase de décélération et la phase de croisière. De plus, l'utilisation d'un tel trajet permet de mieux analyser les différents profils optimaux dans des contextes bien spécifiques notamment l'étude de l'influence de la pente.

Cette section ne sera pas complète si on ne souligne pas le caractère anticipatif des consignes données par l'approche. Cela est démontré par le problème lié aux changements des limitations de vitesse tout au long du parcours. Dans les études antérieures, le problème de limitation de vitesse n'a pas été traité. Pour conclure, on se propose d'étudier un trajet entre deux arrêts distants de 4 km. Il s'agit d'un trajet très typique. La plus grande majorité du trajet est plane avec des pentes peu significatives pour un véhicule léger (inférieures à 2%) et une partie d'environ 800 m comportant de très fortes pentes (environ 15%). Le trajet est divisé en différentes zones avec des limitations de vitesse à 50, 70 et 90 km/h.

Comme les précédentes études, on calcule le profil qui correspond au problème en temps minimal. La figure 4.17 présente les profils obtenus pour ce problème. On retrouve les mêmes

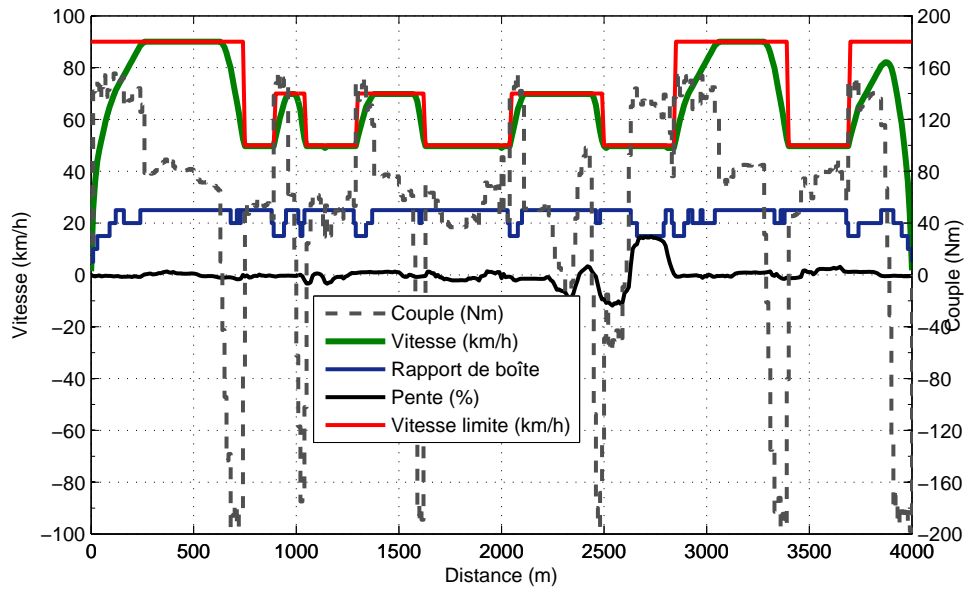


FIG. 4.17: Profils optimaux sur un trajet de 4 km entre deux arrêts : cas en temps minimal (les rapports de boîte sont multipliés par un facteur 5 et représentés avec l'échelle à gauche)

comportements que sur le trajet court. Il s'agit d'accélérer fortement pour atteindre la vitesse limite le plus rapidement possible. On maintient cette vitesse le plus longtemps possible avant de décélérer fortement pour rester dans la zone de limitation de vitesse inférieure. Si on regarde le couple utilisé (courbe en pointillés), le maximum de capacité d'accélération et de freinage est atteint pour accélérer et décélérer sans tenir compte de l'effet lié à la pente.

Il reste un point important à souligner concernant le rapport de boîte de vitesse. Le rapport le plus élevé est utilisé pendant la phase de croisière et les rapports inférieurs sont utilisés pour la phase d'accélération. On a souligné la limite de l'approche du modèle de boîte de vitesse avec de fortes pentes. Ce défaut n'existe plus avec la nouvelle approche. Sur l'intervalle [2000 m ; 3000

m], le troisième rapport est utilisé pour grimper la très forte montée.

Passons maintenant aux jeux de coefficients qui nous aboutissent à un bon compromis entre le temps de trajet et la consommation. Les profils optimaux sont présentés sur la figure 4.18.

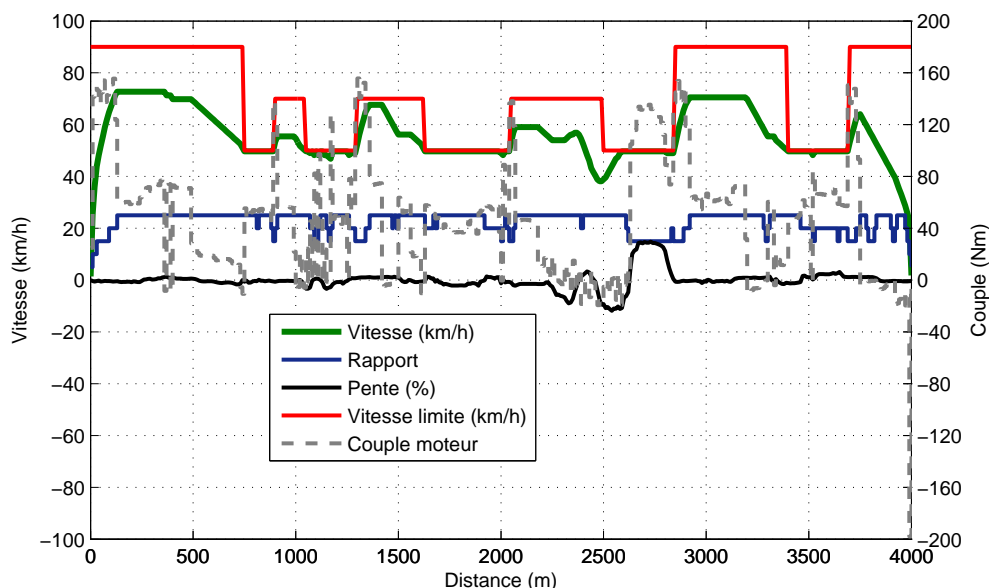


FIG. 4.18: Profils optimaux sur un trajet de 4 km entre deux arrêts : $Q1=0.5$ $Q2=1$ $Q3=0.2$

Dans ce cas, la vitesse moyenne est moins importante. Le pourcentage d'utilisation du frein moteur est beaucoup plus élevé. Ce qui a le double effet de réduire la consommation et augmenter le temps de trajet (tableau 4.3).

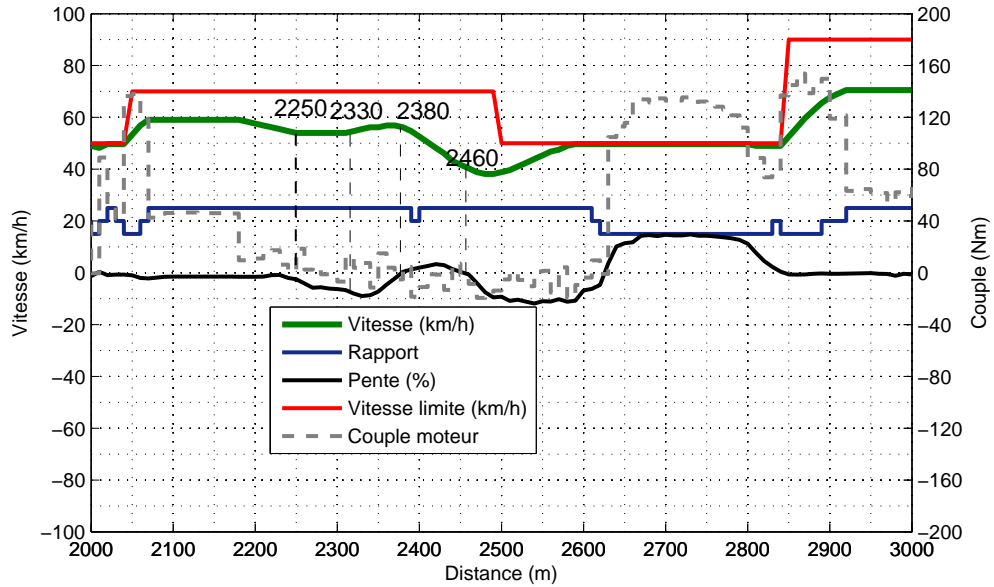
TAB. 4.3: Compromis entre le temps du trajet et la consommation de carburant, étude sur un trajet de 4 km

Coefficients	Temps (s)	Consommation (l/100km)
$Q1=0.0, Q2=1$	240	10
$Q1=0.1, Q2=1$	270 (+12%)	7.6 (-24%)

La différence entre les deux ensembles de profils est alors très remarquable en terme de consommation. Une vitesse moyenne plus basse permet d'expliquer en partie cette différence. On remarque aussi sur ce deuxième exemple le caractère anticipatif du profil. En connaissant par avance les changements de limitation de vitesse, on peut les anticiper en décélérant progressivement avec le frein moteur ou par un faible couple moteur.

On remarque que l'influence de la pente sur le profil n'est pas significative le long du trajet, à l'exception de la zone entre 2000 m et 3000 m.

Sur cet intervalle, on a une succession de vallées et de collines avec de fortes pentes. On trouve que les analyses précédentes sur un trajet court restent valides. On maintient la vitesse constante dans la descente pendant 80 m (entre 2250 m et 2330 m). Ensuite, on profite d'une pente plus grande pour augmenter la vitesse avant de grimper la montée. Le long de cette montée, on relâche la pédale. La vitesse diminue progressivement jusqu'à la forte descente à 2460 m. Avec une inclinaison beaucoup plus conséquente, on ne maintient plus la vitesse comme dans

FIG. 4.19: Profils optimaux de la piste d'essais : $Q1=0.5$ $Q2=1$ $Q3=0$

la précédente descente mais on profite pour accélérer avant d'aborder la montée. Cela évite de freiner et de perdre la force de gravité inutilement. Une fois la vitesse maximale atteinte, celle-ci est maintenue pour franchir la montée. Ce comportement diffère de la dernière montée où on avait ralenti, mais cela n'est pas forcément très surprenant dans la mesure où le fait de ralentir sur une telle montée ne permet pas d'avoir une puissance suffisante pour la franchir. Cette partie du trajet, riche en enseignements, montre encore une fois que les consignes d'éco-conduite ne sont pas adaptées à toutes les situations, ce qui sera bien au contraire le cas d'un système d'aide à la conduite bien conçu.

En étudiant un trajet plus conséquent, on prouve que l'étude effectuée sur un trajet simple est tout à fait cohérente. La méthode utilisée est alors applicable pour donner des consignes précises au conducteur à des fins d'économie en carburant. Le compromis entre la consommation, le temps de trajet et le confort du passager est de nouveau remarqué. L'aspect sécurité se limite à la prise en compte de la limitation de vitesse et à l'encouragement d'une conduite douce. Sur l'ensemble des simulations, on remarque que la vitesse consigne ne dépasse jamais la vitesse légale. Par ailleurs, il semble que le cas de faibles pentes n'ait pas d'influence sur les profils optimaux dans le cas du véhicule léger. Ce qui ne sera pas le cas dans le contexte d'un véhicule de type poids lourd présenté dans [LHD⁺10].

Il faut souligner que cette approche permet le calcul hors ligne des profils optimaux utilisés dans un contexte très isolé sur des pistes d'essais. Si on sort de ce contexte, la prise en compte des conditions de circulation et des différents événements possibles, est primordiale pour que le système soit accepté par le conducteur. Pour cela, des améliorations semblent nécessaires pour parfaire la construction du système. C'est ce que nous allons présenter dans la section suivante.

4.2 Approche pour un calcul en ligne

La méthode présentée précédemment est limitée car elle ne peut être appliquée que pour des situations de conduite bien particulières, en environnement peu variable et connu (par exemple le cas d'un bus sur "site propre"). Le fait de calculer des profils hors ligne ne permet pas d'avoir un comportement souple en fonction des différents événements possibles, notamment les situations de conflits entre les consignes écologiques et sécuritaires. Une approche en ligne est alors nécessaire. Elle rendra le système encore plus interactif et plus cohérent à l'usage. Pour cela, le temps de calcul est le premier problème à résoudre. Il est abordé par le changement de méthode de discrétisation, l'utilisation de l'horizon électronique glissant et la réduction de l'espace de recherche. On commence cette section par une analyse du problème de temps de calcul avant de détailler toutes ces techniques. On finira par présenter l'algorithme pour le calcul en ligne.

4.2.1 Analyse de la complexité de la programmation dynamique

La programmation dynamique est connue pour sa facilité de mise en œuvre mais aussi pour son problème d'explosion de calcul que Bellman appelle "the curse of dimensionality". En effet, le temps de calcul varie de façon exponentielle par rapport à la dimension de l'espace d'état. Dans cette partie, on s'intéresse à ce phénomène à travers notre problème concret d'optimisation.

Prenons comme exemple de départ la résolution du problème simplifié dans le chapitre §3. On a dans ce cas trois espaces discrétisés qui sont le temps, la distance et la vitesse. Les variables de commande ne sont pas discrétisées mais directement calculées à partir de l'équation du mouvement longitudinal du véhicule. Cela permet déjà de diminuer la dimension du problème.

Dans ce cas, le trajet est discrétisé en temps avec un pas de discrétisation Δt . Chaque état est défini par le couple (x_t, v_t) . Si on appelle N_x et N_v , respectivement le nombre de valeurs discrétisées pour la distance x et la vitesse v , le nombre d'état correspond alors à $N_x * N_v$. Le problème discrétisé est illustré sur la figure 4.20.

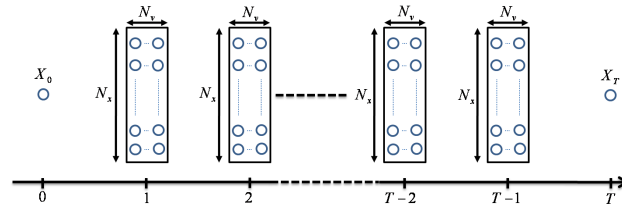


FIG. 4.20: Discrétisation du problème en temps

On a un seul état initial X_0 et un seul état final X_T . Le nombre de valeurs discrètes du temps est de $T + 1$.

L'algorithme PD peut être simplement énoncé de la façon suivante. Pour chaque état à l'instant $t \in \{0, \dots, T\}$, on doit trouver un état à l'instant $t - 1$ dont le coût de la transition entre les deux états est minimal. Calculons d'abord le nombre d'opérations nécessaire pour trouver les transitions de coût minimal entre $t - 1$ et t . On suppose que le nombre d'opérations pour évaluer le coût et vérifier les contraintes de la transition d'un état à l'instant $t - 1$ à un état à l'instant t est ndo . Le nombre d'opérations pour chaque état à l'instant $t - 1$ est alors $ndo * N_x * N_v$. Et comme à chaque instant $t - 1$, on a $N_x * N_v$ états, le nombre d'opérations entre deux instants $t - 1$ et t est alors $ndo * (N_v * N_x)^2$.

Ensuite, aux instants $t = 0$ et $t = T$, on a un seul état pour chaque instant. Le nombre total

d'opérations NdO pour la recherche du couple optimal est égal à :

$$NdO = (T - 3) * (ndo * (N_v * N_x)^2) + 2 * N_v * N_x \quad (4.10)$$

Le nombre d'opérations dépend donc de la dimension de l'espace d'états (le nombre de variables et le nombre de valeurs discrétisées). Calculons le temps de calcul nécessaire pour le problème simplifié avec des pas de discrétisation présentés dans le tableau 4.4.

TAB. 4.4: Valeurs des différents paramètres de simulation

Variable	Plage de valeurs	Pas de discrétisation	Nombre de valeurs discrétisées
Temps (t (s))	[0, 60]	$\Delta t = 1$	$T = 61$
Vitesse (v (m/s))	[0, 25]	$\Delta v = 1/3.6$	$N_v = 91$
Distance (x (m))	[0, 800]	$\Delta x = \Delta t * \Delta v$	$N_x = 2881$

Prenons l'exemple de $ndo = 10$, le nombre total d'opérations NdO pour le problème est de $NdO = 3.9866 * 10^{13}$. Avec un processeur cadencé à 1 GHz (ce qui signifie que 1 milliards d'opérations peuvent être faites en une seconde), il nous faut au moins 11h de calcul pour déterminer les profils optimaux ! Il est alors unimaginable d'implémenter cet algorithme sur un calculateur embarqué. Il faut réduire de façon très conséquente ce temps de calcul.

La première technique utilisée par de nombreux auteurs est le changement de méthode de discrétisations.

4.2.2 Changement de méthode de discrétisation

Cette étape consiste à transformer le problème dépendant du temps en un problème dépendant de la distance par la relation (4.1). Dans ce cas, chaque état est défini par le couple vitesse et rapport de boîte. Le trajet est alors discrétisé en distance. La forme discrète du problème présentée par la figure 4.20 est transformée comme le montre la figure 4.21.

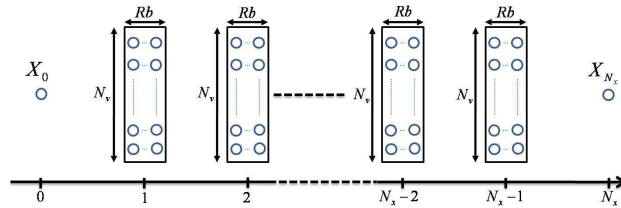


FIG. 4.21: Discrétisation du problème en distance

Dans cette nouvelle formulation, le nombre d'état est fortement diminué car le rapport de boîte ne prend que 5 valeurs possibles. Le nombre d'état à chaque pas de calcul est de $Rb * N_v$. En même temps, on peut augmenter le pas de discrétisation de la distance sans trop dégrader la précision de calcul. On prend alors un pas de discrétisation de distance de $\Delta x = 10m$. Le nombre d'opérations pour calculer les profils optimaux est alors :

$$NdO = (N_x - 3) * (ndo * (N_v * Rb)^2) + 2 * N_v * Rb \quad (4.11)$$

En utilisant les valeurs numériques, le temps de calcul pour un trajet de 800 m diminue de plus de 11h à 160 ms ! La réduction du temps de calcul est effectivement très conséquente.

Il est alors évident que ce temps de calcul reste encore élevé pour un ordinateur beaucoup moins puissant ou si on fait le calcul sur un trajet beaucoup plus long. Vient alors l'idée de résoudre le problème sur un trajet plus court et de répéter le calcul au fur et à mesure que le véhicule avance. C'est ce que l'on appelle communément l'horizon électronique glissant.

4.2.3 Utilisation de l'horizon électronique

Le concept consiste à diviser le trajet en M étapes de calcul de pas Δm . À chaque étape, on va chercher le profil optimal sur un horizon S moins important, par résolution du problème optimal sur cet horizon. On obtient alors à chaque étape de calcul un ensemble de profils optimaux qui seront des consignes à donner au conducteur ou au système de contrôle dans le cas du système actif. Le processus se répète jusqu'à la fin du trajet. Pour chaque nouvelle étape, on a de nouvelles conditions initiales qui correspondent à la dynamique actualisée du véhicule. Cette stratégie est résumée sur la figure 4.22.

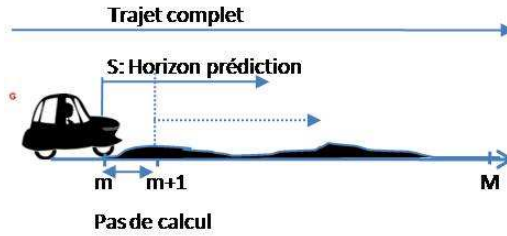


FIG. 4.22: Stratégie d'optimisation

La question de discrétisation en temps ou en distance est à nouveau posée. Contrairement à la résolution de la programmation dynamique, la discrétisation en temps est cette fois-ci choisie. En effet, le calcul des profils optimaux n'est pas instantané. Il est alors nécessaire d'avoir un pas de calcul supérieur au temps nécessaire pour la recherche du profil optimal. La discrétisation en distance a un gros inconvénient, c'est qu'elle dépend de la vitesse. Le temps entre deux pas de calcul est donc forcément très variable. Ceci peut engendrer le risque que les calculs ne soient pas terminés avant le prochain pas de calcul. De plus, la mesure du temps écoulé par les horloges électroniques dans les ordinateurs est plus précise que la mesure de la distance parcourue par des odomètres plus sensibles à l'environnement extérieur.

Par conséquent, pour déterminer la prochaine vitesse à donner au conducteur, une interpolation linéaire en temps est utilisée. Reprenons la figure 4.23 avec, comme modification, la discrétisation en temps et un profil de vitesse optimale calculé sur l'horizon S . Δt est le pas de discrétisation en temps. Δt_1 et Δt_2 sont les temps moyens entre deux pas de calcul de la programmation dynamique. Dans cet exemple, on a $\Delta t_1 < \Delta t < \Delta t_1 + \Delta t_2$. L'objectif de vitesse (vitesse de consigne) est alors calculée par :

$$v = v_{\Delta x} + \frac{(\Delta t - \Delta t_1) - \Delta t_2}{\Delta t_2} * (v_{\Delta x} - v_{2\Delta x}) \quad (4.12)$$

Le rapport de boîte de consigne est celui associé au pas de discrétisation dont la vitesse est la plus proche de la vitesse de consigne calculée par l'équation (4.12). Dans notre exemple, c'est le rapport associé au pas de calcul $2\Delta x$.

On peut remarquer que, contrairement à une approche prédictive, ce n'est pas forcément la première commande qui sera appliquée. C'est pour cela que l'on ne souhaite pas utiliser l'expression "approche prédictive" pour cette technique.

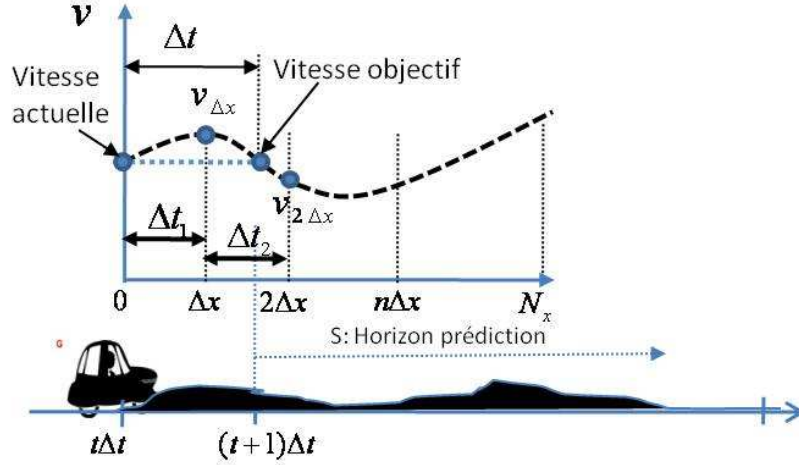


FIG. 4.23: Méthode de calcul de la vitesse de consigne

En plus, le problème à résoudre n'a pas un seul état final, mais plusieurs.

Par ailleurs, l'avantage de l'utilisation d'un horizon électronique est qu'il permet de réduire le temps de calcul de notre algorithme initial et de recalculer périodiquement les profils optimaux afin de tenir compte des informations dynamiques, notamment les informations liées à la sécurité que l'on va traiter dans le prochain paragraphe. L'utilisation de l'horizon électronique ouvre aussi la possibilité de réduire encore l'espace de recherche.

4.2.4 Réduction de l'espace de recherche

L'équation (3.9) présente les contraintes liées à la vitesse. Il s'agit d'un intervalle borné défini par une borne supérieure v_{ub} et une borne inférieure v_{lb} . On remarque que ce sont ces contraintes qui définissent la dimension de l'espace discrétisé de la vitesse et donc le nombre d'états. La réduction de l'écart entre v_{ub} et v_{lb} permet de réduire le temps de calcul. Cela est possible grâce à l'utilisation de l'horizon électronique. En effet, au lieu d'utiliser un espace de taille fixe et large tout au long du trajet, nous allons utiliser des espaces de tailles réduites à chaque étape de calcul. On note v_t^{ub} et v_t^{lb} les deux contraintes de vitesse pour définir cet espace à chaque pas de calcul. Pour la borne supérieure, elle va être définie par la limitation de vitesse et par les vitesses de sécurité discutées dans le chapitre suivant. La borne inférieure est définie quant à elle en fonction de la vitesse du véhicule et en fonction de la situation de conduite (en croisière, en phase d'accélération, à l'approche de l'objectif...). Il est par exemple inutile de tenir compte des états où la vitesse est très basse alors que le véhicule circule sur une autoroute. Par conséquent, pour chaque phase de conduite, on a des limites inférieures v_t^{lb} différentes. La figure 4.24 illustre ce principe pour réduire l'espace de recherche.

Au début, comme on est en phase de démarrage, on n'a pas besoin de chercher des vitesses proches de la vitesse maximale. Ensuite, la vitesse commence à augmenter, on peut ainsi augmenter la limite inférieure. Dans la phase de croisière, on va chercher la vitesse optimale dans un intervalle proche de la vitesse actuelle.

Cette approche permet d'avoir la taille de l'espace de recherche variable et moins importante. Mais elle crée aussi le problème de temps de calcul variable en fonction des phases où l'on se situe. Si on souhaite fixer le temps de calcul, on peut ajuster l'horizon électronique.

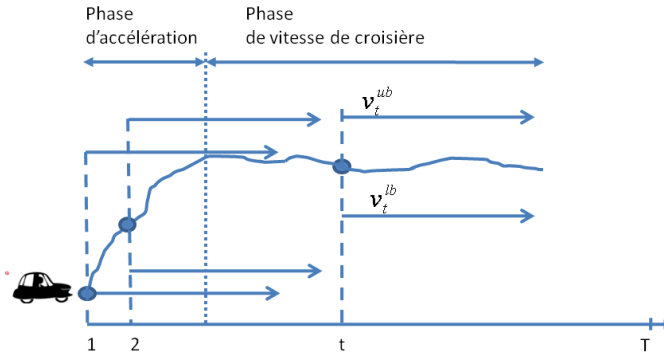


FIG. 4.24: Stratégie de réduction de l'espace de recherche. La dimension de l'espace de recherche varie en fonction de la phase où le véhicule se trouve. En phase d'accélération à partir d'une vitesse basse, la dimension de l'espace de recherche est plus grande qu'en phase de croisière

4.2.5 Conclusion

Le temps de calcul important a été le principal inconvénient de la programmation dynamique. Les différentes techniques présentées ci-dessous permettent de surmonter ce défaut. Une recherche de consignes optimales en temps réel est néanmoins possible. Le fait d'utiliser un horizon glissant change aussi la façon de résoudre le problème d'optimisation de consommation en carburant. On résout donc un ensemble de sous-problèmes optimaux avec des conditions initiales et finales à chaque fois différentes.

La question se pose sur le choix de l'horizon électronique. Comme les consignes sont calculées périodiquement à intervalles de temps constants, il n'est pas nécessaire d'avoir un horizon de calcul trop grand. L'objectif est d'avoir un horizon de calcul de petite dimension pour réduire le temps de calcul mais suffisant pour que le caractère d'anticipation ait encore un sens. De plus, les simulations pour le trajet de 4 km de la piste d'essai du LIVIC, avec les différents horizons électroniques ne montrent pas des différences de résultats significatives. Le choix de l'horizon électronique se fait seulement sur le compromis entre le temps de calcul et l'horizon pour avoir une approche la plus globale possible. Ce choix a été fait à travers différentes simulations et tests d'expérimentation.

4.3 Extension au problème de sécurité

Le système d'aide proposé jusqu'à maintenant permet de donner des consignes dont l'objectif est de réduire la consommation en carburant. Pour qu'un tel système soit accepté par le conducteur, il doit fournir des consignes claires, précises et non contradictoires. En utilisant une approche de calcul en ligne, on améliore la réaction du système face à une situation de conduite réaliste mais cela demeure encore insuffisant. En effet, même s'il existe une corrélation entre une conduite écologique et sécuritaire, des situations compromettant cette relation existent. Pour cela, un système d'aide à la conduite écologique doit être capable de prendre en compte ces situations, ce qui peut mettre en valeur d'ailleurs un tel système par rapport à une pratique d'éco-conduite.

Dans les chapitres précédents, le problème de sécurité est limité au respect de la limitation de vitesse. Cette prise en compte tend à prévenir le problème d'excès de vitesse que la plupart des conducteurs ont tendance à pratiquer. Elle permet de diminuer le risque d'accidents liés à un

dépassement de vitesse dans des zones limitées. Tout de même, cela représente une partie très restreinte des problèmes d'insécurité routière. Dans le contexte d'une conduite sur route rurale, on souhaite intégrer dans notre système deux aspects de ce problème : le problème de sécurité en approche de virage et le problème de distance de sécurité entre véhicules. Avec cela, on souhaite rendre le système à la fois écologique, car il permet de réduire la consommation et sécuritaire car il préviendra le conducteur de certains risques d'insécurité sur un trajet donné. La section qui suit permet de mettre en place le contexte qui sera abordé.

4.3.1 Définition du contexte de sécurité

Il existe actuellement des systèmes informatifs signalant au conducteur les risques liées à l'approche d'un virage et à une distance de sécurité inadaptée [BM79]. Dans le premier cas, on peut citer l'exemple du système développé par Daimler-Chrysler [Her02], qui définit une vitesse limite à partir de la courbure d'une portion de route. Dans un deuxième cas, de nombreux systèmes d'alerte de risque de collision [ML05] avec le véhicule précédent existent déjà, notamment les systèmes CWAB (Collision Warning with Auto Brake) et City Safe de Volvo. Avant de présenter notre approche, nous faisons une revue de ces systèmes.

Vitesse à l'approche du virage

Au travers des données statistiques, [Gla04] a constaté qu'une large part de l'accidentologie est due à des erreurs d'appréciation de la part du conducteur, de la difficulté en approche de virage. Ces erreurs se traduisent souvent par une vitesse inadaptée, rendant le franchissement difficile voir impossible. Dans un trajet sur route rurale, le nombre de virages peut s'avérer important. Sans tenir compte de ce problème, le système d'éco-conduite peut fournir les consignes précises pour réduire la consommation mais inadéquates en terme de sécurité. Le système devient donc moins fiable et voire dangereux pour le conducteur. Tenir compte de cette contrainte devient une démarche nécessaire dans la conception d'un système d'aide à la fois écologique et sûr.

Il ne s'agit pas de résoudre complètement ce problème dans le cadre de notre thèse. On se contente de reprendre des travaux réalisés au LIVIC, notamment la thèse de [Gla04]. Les notations suivantes sont utilisées par l'auteur pour décrire la géométrie de la route : θ_{route} pour la pente, ϕ_{route} pour le dévers et ρ_{route} pour la courbure.

Dans la littérature, la vitesse maximale à laquelle un véhicule peut aborder un virage est donnée par :

$$V = \sqrt{\frac{g\mu}{\rho_{route}}} \quad (4.13)$$

où g est l'accélération de la gravité et μ , l'adhérence maximale mobilisable en latéral. Elle est en fonction des caractéristiques de l'interface pneumatique/chaussée et varie entre 0 et 1. Une adhérence égale à 1 correspond au cas d'une route sèche avec de bons pneumatiques. Une valeur comprise entre 0.5 et 0.6 correspond à une chaussée humide. En prenant en compte le dévers et le comportement du conducteur, la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) recommande, pour l'élaboration et le développement d'un Système d'alerte en Virage (SAV) que la vitesse maximale à l'approche d'un virage, V_c , est déterminée par l'équation suivante qui tient compte du dévers de la route :

$$V_c = \sqrt{\frac{g}{\rho_{route}} \left(\frac{\phi_{route} + \mu}{1 - \phi_{route}\mu} \right)} \quad (4.14)$$

Ces modèles assez simples présentent, selon [Gla04], de sérieux défauts qui peuvent amener à une sur-estimation de la vitesse maximale avec laquelle un véhicule peut aborder un virage. Une nouvelle approche est alors proposée par l'auteur, fournissant une vitesse de consigne plus précise. Le modèle tient compte à la fois de la géométrie de la route avec la pente, le dévers et la courbure ; la succession possible des virages ; les effets de la dynamique longitudinale sur la dynamique latérale et notamment le phénomène de transfert de charge en freinage, et surtout, le comportement du conducteur au travers de deux coefficients adimensionnels, λ_{lat} et λ_{lon} . La vitesse maximale sûre est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \text{freinage} \\ 1 = \left(\frac{1}{\lambda_{lat}\mu_{max}} \frac{\frac{\rho_{route}V^2}{g} + \phi_{route}}{1 + \frac{H}{L_{av}}(\frac{V}{g}\frac{dV}{ds} - \theta_{route})} \right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_{lon}\mu_{max}} \left(\frac{V}{g}\frac{dV}{ds} - \theta_{route} \right) \right)^2 \\ \text{accélération} \\ 1 = \left(\frac{1}{\lambda_{lat}\mu_{max}} \frac{\frac{\rho_{route}V^2}{g} + \phi_{route}}{1 - \frac{H}{L_{ar}}(\frac{V}{g}\frac{dV}{ds} - \theta_{route})} \right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_{lon}\mu_{max}} \left(\frac{V}{g}\frac{dV}{ds} - \theta_{route} \right) \right)^2 \end{cases} \quad (4.15)$$

avec les conditions limites suivantes :

$$\begin{cases} \theta_{route} > 0 \\ V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 - \frac{H}{L_{av}}\theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon}\mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat}\mu_{max} - \phi_{route} \right) \\ \theta_{route} < 0 \\ V^2 = \frac{g}{\rho_{route}} \left(\left(1 + \frac{H}{L_{ar}}\theta_{route} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\theta_{route}}{\lambda_{lon}\mu_{max}} \right)^2} \lambda_{lat}\mu_{max} - \phi_{route} \right) \end{cases} \quad (4.16)$$

avec μ_{max} une adhérence mobilisable maximale. Ces équations permettent de calculer un profil de vitesse d'approche en virage en fonction des capacités du conducteur. On va donc considérer ces consignes dans notre démarche pour donner des consignes économiques en carburant tout en étant sûres.

On continuera ensuite par présenter le deuxième problème de sécurité que l'on souhaite traiter avant de présenter comment on peut les intégrer dans un système d'économie de carburant.

Distance de sécurité

La figure présente quelques définitions liées au problème de la distance de sécurité entre véhicules.

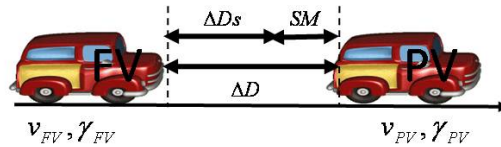


FIG. 4.25: Problème de la distance de sécurité entre véhicules

Le véhicule suivi s'appelle PV et le véhicule suiveur est appelé FV . Les variables γ_{FV} , γ_{PV} sont les capacités de freinage de chaque véhicule. Elles dépendent de leurs différentes caractéristiques. Les variables v_{FV} et v_{PV} sont leurs vitesses.

On appelle ΔD la distance entre deux véhicules et ΔD_s la distance de sécurité pour ne pas entrer en collision en cas d'arrêt d'urgence et sera défini ultérieurement. $SM = \Delta D - \Delta D_s$ est

définie comme la marge de sécurité. Tant que cette marge reste positive, il n'y a pas de risque de collision. Dans la littérature, on retrouve les définitions suivantes :

- La distance d'arrêt D_{brake} d'un véhicule est la distance nécessaire à un véhicule pour s'arrêter compte-tenu de sa vitesse. Cette distance est la somme de la distance de freinage, distance nécessaire à un véhicule pour passer de sa vitesse courante à la vitesse nulle et de la distance parcourue par un véhicule à vitesse constante pendant le temps de perception-réaction τ du conducteur. Elle est calculée par l'expression

$$D_{arrtFV} = v_{FV}\tau + \frac{v_{FV}^2}{2\gamma_{FV}} \quad (4.17)$$

- La distance de freinage, $D_{freinage}$ par rapport à un obstacle mobile, est la différence entre la distance d'arrêt et la distance parcourue par le véhicule suivi à partir du moment où il freine. Cette distance est égale à :

$$D_{brakeFV} = v_{FV}\tau + \left(\frac{v_{FV}^2}{2\gamma_{FV}} - \frac{v_{PV}^2}{2\gamma_{PV}} \right) \quad (4.18)$$

- La distance à 2 secondes, D_{2s} , est la distance qu'il faut laisser entre deux véhicules qui se suivent, imposée par la loi française (Article R412-12, Modifié par le Décret n°2003-293 du 31 mars 2003). Elle correspond à la distance parcourue par le véhicule suiveur à vitesse constante pendant 2 secondes.

$$D_{2s} = 2 \times v_{FV} \quad (4.19)$$

Plusieurs scénarios peuvent être considérés. Si ΔD est plus grande que D_{arrt} , le véhicule suiveur peut éviter un obstacle lui-même esquivé par le véhicule suivi. Si ΔD est plus grande que la distance de freinage D_{brake} , la collision entre véhicules peut être évitée. Finalement, si la distance ΔD est plus grande que D_{2s} , on respecte le code de la route français.

Dans notre étude, le critère utilisé est la distance de sécurité définie par le code de la route français. Celui-ci s'écrit alors :

$$\Delta Ds = h \times v_{FV} + l \quad (4.20)$$

où l est la distance résiduelle entre deux véhicules à la position d'arrêt et $h = 2s$ est le temps intervéhiculaire sécuritaire.

La notion de distance de sécurité étant maintenant définie, il nous semble important de souligner notre objectif.

En effet, on ne cherche pas à maintenir une distance de sécurité entre deux véhicules, problème qui fait l'objet de plusieurs études [ML05], mais on cherche plutôt à éviter les situations d'insécurité. Cela signifie que le but n'est pas de maintenir la marge de sécurité proche de zéro mais plutôt d'éviter qu'elle soit négative. Cette différence mérite d'être soulignée. En effet, si le véhicule suivi a un profil de vitesse optimal en terme d'économie de carburant, on peut obtenir le même gain en maintenant une distance constante avec ce dernier, à condition que les deux véhicules soient identiques. Dans le cas contraire, l'économie de carburant n'est plus assurée en maintenant une marge de sécurité proche de zéro. Le profil optimal du véhicule suiveur pourrait être obtenu en laissant une marge de sécurité importante. Par la suite, les résultats de simulations vont confirmer cette hypothèse.

Avec le respect de la limitation de vitesse, notre problème de sécurité compte deux autres éléments que sont la vitesse en approche de virage et la vitesse pour diminuer le risque de collision entre véhicules. On répartit ces trois informations liées à la sécurité en deux catégories. La vitesse limite et la vitesse en approche de virage sont considérées comme des informations statiques. Par

opposition, la distance de sécurité est une information dynamique. En effet, si les deux premières sont déterministes puisqu'elles dépendent de l'infrastructure et du véhicule, la dernière ne l'est pas car elle dépend de la vitesse des véhicules suivi et suiveur. Par conséquent, l'intégration de ces informations dans le système ne se fera pas de la même manière.

Comme la limitation de vitesse, la vitesse à l'approche et en virage est considérée comme un élément de notre base de données de l'infrastructure. Elle est alors considérée comme une contrainte supplémentaire au problème d'optimisation. Une approche en ligne de cette consigne de sécurité est par ailleurs tout à fait envisageable avec l'utilisation de l'horizon électronique présentée précédemment. Mais dans le contexte de notre étude, nous allons rester sur la première solution dont l'avantage fait qu'elle ne nécessite pas d'effort de calcul supplémentaire. La gestion du problème de distance de sécurité est alors différente. Elle doit être traitée en ligne. Cela fait l'objet du paragraphe suivant.

4.3.2 Choix de la stratégie

Pour avoir un système, dont les consignes données au conducteur pour réduire sa propre consommation ne sont pas contradictoires aux consignes de sécurité, on peut choisir une structure parallèle comme le montre la figure 4.26.

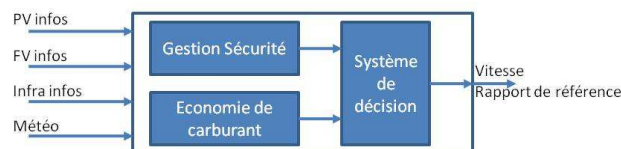


FIG. 4.26: Structure parallèle pour un système écologique et sécuritaire

Le principe de cette structure est simple. Les deux modules de sécurité et d'optimisation calculent leurs consignes séparément. Un système de décision va prendre la consigne la plus contraignante des deux modules pour la communiquer au conducteur. Le module de sécurité peut quant à lui être composé d'un autre bloc dont feront partie le système d'alarme en distance de sécurité et d'excès de vitesse en virage. L'avantage d'une telle structure est que l'on peut résoudre les problèmes séparément et donc créer par la suite un système de décision qui permette d'aboutir à un système cohérent. Une telle structure sera intéressante à tester pour connaître son efficacité.

Dans notre étude, on souhaite adopter une approche différente qui consiste à résoudre le problème d'économie de carburant et le problème de distance de sécurité simultanément. La première motivation de cette approche est qu'elle permet d'éviter d'éventuelles oscillations sur les consignes, mais la plus importante, à notre avis, est qu'elle permet d'avoir un système non seulement sécuritaire mais surtout plus efficace. En effet, le fait de rechercher un profil optimal sans tenir compte des conditions de trafic permet d'avoir une solution optimale en terme d'économie de carburant. Mais si la consigne de vitesse est plus contraignante, le caractère écologique sera perdu. Par contre, si on considère le contexte de sécurité, et si on cherche dans ce contexte la solution optimale, on aura toujours un système économique, écologique et sécuritaire. En d'autres termes, on aura toujours une solution, soit optimale, soit sous-optimale en fonction du contexte de sécurité avec cette nouvelle approche. Notons que ceci n'était pas le cas avec la structure présentée précédemment.

Partant de cette remarque, une structure en cascade est utilisée (figure 4.27). À partir des informations propres aux véhicules (position, vitesse, accélération) ainsi que des informations

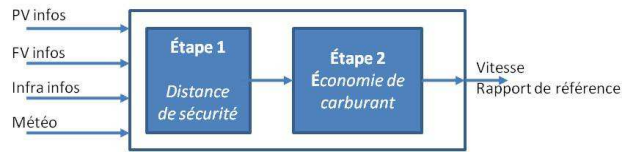


FIG. 4.27: Structure en cascade

liées à la route, le niveau 1 définit comment le véhicule suiveur doit réagir pour éviter une situation d'insécurité. Elle fournit un intervalle de vitesse dans lequel le module d'optimisation va rechercher la vitesse qui réduit le plus la consommation dans ce contexte de sécurité. Sur un horizon électronique adéquat, on peut supposer que la dynamique du véhicule précédente reste constante, ce qui nous permet d'avoir un intervalle de vitesse constant sur l'horizon de calcul. Cet intervalle est recalculé à chaque étape, cette hypothèse reste cohérente. Si la dynamique du véhicule change, l'intervalle de vitesse va aussi changer. On optimise alors la consommation en carburant dans un nouveau contexte de sécurité.

Comme on l'a souligné, il existe déjà des systèmes qui émettent des alertes concernant la distance intervéhiculaire et d'autres qui permettent au véhicule suiveur de rester à distance constante par rapport au véhicule suivi. Pour ce problème, on a choisi une approche différente. Au lieu d'alerter le conducteur quand il est déjà dans une situation d'insécurité, on essaie d'évaluer la situation limite en dehors de laquelle le véhicule suiveur pourrait entrer dans une situation d'insécurité. Cette évaluation est basée sur le comportement du véhicule qui nous précède et sur la situation actuelle. En raison de la nature incertaine des informations, notamment du comportement du véhicule précédent, une approche par logique floue est préférée.

4.3.3 Contrôleur de logique floue

A chaque instant, on peut avoir trois actions longitudinales suivantes : accélérer, décélérer, et rester à vitesse constante. On va utiliser ces trois comportements pour analyser quelques exemples simples. On suppose dans un premier temps que le véhicule précédent est à vitesse constante.

- **Première situation : marge de sécurité positive.** Ce scénario signifie qu'on est dans une situation de sécurité. Mais selon nos actions à cet instant, la situation peut changer. Si on accélère fortement, le risque d'entrer, dans un avenir proche, dans une situation d'insécurité est grand. Si on reste à vitesse constante ou décélère, on ne prend aucun risque.
- **Deuxième situation : marge de sécurité proche de zéro.** Ce scénario représente une situation adéquate. Si on reste à vitesse constante ou si on décélère, on respecte la distance de sécurité. Au contraire, si on accélère, la situation d'insécurité apparaît.
- **Troisième situation : marge de sécurité négative.** Ce scénario représente une situation d'insécurité. Si on décélère, on l'améliore et voire on sort de cette situation, mais si on accélère, la situation s'aggrave.

Sur ces trois exemples, on peut voir la complexité du problème. En fonction de l'amplitude de nos actions les différentes situations peuvent se présenter. On remarque aussi le caractère non déterministe du comportement du véhicule précédent. Il rend aussi l'évaluation de la situation plus complexe. Ces raisons nous a conduit à utiliser l'approche par la logique floue, qui nous semble la plus adaptée à ce problème.

Objectif

L'objectif de cette brique est de fournir des informations de sécurité pour le module d'optimisation. En fonction de la marge de sécurité, de la réaction du véhicule suivi et de la vitesse relative entre véhicules, un intervalle de vitesses dans la quelle la distance de sécurité assurée est fourni. Cet intervalle est défini par $[v_{FV} + \Delta v_{FV}^+; v_{FV} + \Delta v_{FV}^-]$. $\Delta v_{FV}^+, \Delta v_{FV}^-$ sont les variations maximales de la vitesse pour lesquelles le véhicule peut atteindre sans entrer dans une situation d'insécurité et v_{FV} est la vitesse actuelle du véhicule. Comme on ne considère pas le véhicule de derrière, la variation Δv_{FV}^- sert uniquement à assurer la fluidité du trafic et réduire l'espace de recherche. La variable Δv_{FV}^+ représente la réaction du véhicule suiveur à la réaction du véhicule suivi.

Une fois cet intervalle défini, la comparaison avec les autres contraintes sur la vitesse (la vitesse légale et la vitesse en approche de virage) permet de déterminer un intervalle de vitesses sûres dans le quel, le module d'optimisation va chercher les profils optimaux en terme d'économie de carburant. La figure 4.28 montre cette démarche.

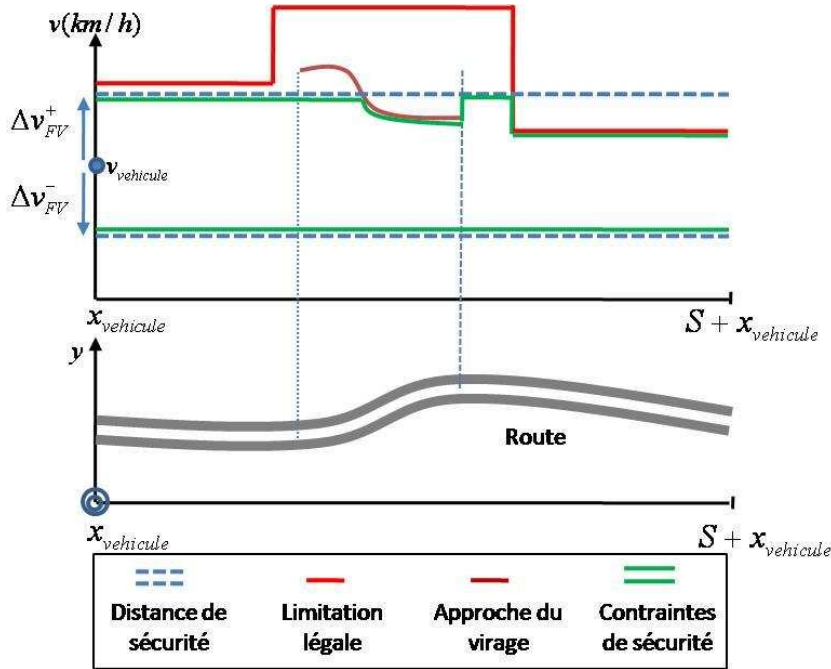


FIG. 4.28: Détermination de l'intervalle de vitesse contrainte

Sur l'horizon électronique S , la limitation de vitesse et la vitesse en approche du virage proviennent de la carte numérique de la route. À chaque distance, la consigne la plus contraignante est sélectionnée.

Par la suite, on va présenter le module basé sur la logique floue pour déterminer l'intervalle assurant le respect de la distance de sécurité.

Mise en place du contrôleur logique floue

Les rappels sur les notions de base de la logique floue sont donnés dans l'annexe. On s'intéresse directement dans cette section à la conception du module contrôleur. La figure 4.3.3 présente la structure du contrôleur logique floue.

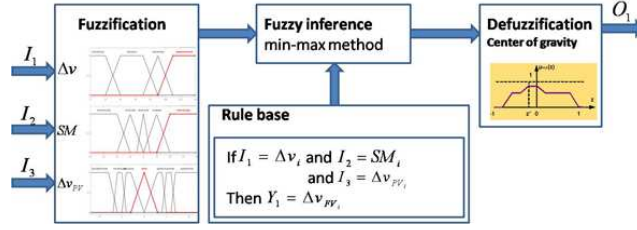


FIG. 4.29: La structure du contrôleur flou

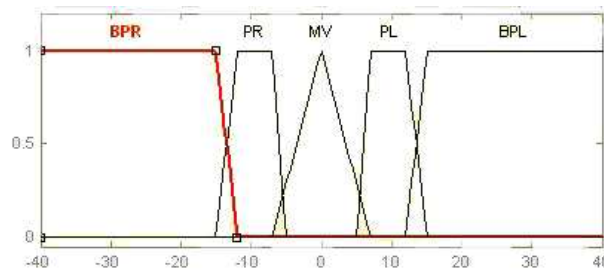
Il comporte trois entrées et une sortie. Les entrées sont la vitesse relative entre véhicules, la marge de sécurité, le comportement du véhicule précédent via le changement de sa vitesse. La sortie est l'amplitude maximale de la variation de vitesse du véhicule suiveur.

La première étape consiste à définir l'univers de discours et les fonctions d'appartenance pour ces variables.

Univers de discours et fonctions d'appartenance

En règle générale, l'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable. Il est défini par un ensemble d'expressions linguistiques. Pour chaque expression, on lui associe une fonction d'appartenance. Le nombre de fonctions d'appartenance peut varier selon l'application. De façon classique, 5 fonctions d'appartenance est un bon compromis. Pour certaines variables, trois peuvent suffir. Ensuite, l'intervalle de valeurs pour chaque variable et pour chaque fonction d'appartenance dépend de l'application. Dans notre cas, il est déterminé après plusieurs tests et simulations. Regardons à présent chaque variable du module.

La vitesse relative entre véhicules est notée $I_1 = v_{PV} - v_{FV}$. La variable floue associée pour cette entrée s'appelle Δv . Elle est définie par cinq fonctions d'appartenances, appelées BPR pour "FV est **B**eaucoup **P**lus **R**apide que PV", PR (pour "Plus Rapide"), MV (pour "Même Vitesse"), PL (pour "Plus Lent") et BPL (pour "Beaucoup Plus Lent"). Sous forme algébrique, elles s'écrivent Δv_i avec $i=1,..,5$. L'ensemble de ces fonctions d'appartenance ainsi que les valeurs les définissant sont présentées dans la figure 4.30.

FIG. 4.30: Fonctions d'appartenance associées à la variable Δv

L'intervalle de valeurs en km/h pour cette variable est $[-40; 40]$.

La différence entre la distance séparant les véhicules et la distance de sécurité (en m) est $I_2 = \Delta D - \Delta DS$. La variable de fuzzification associée s'appelle SM pour la marge de sécurité. Cinq fonctions d'appartenance sont respectivement D (pour situation "Dangereux"), R (pour situation de "Risque"), A (pour distance "Adéquate"), L (pour une "Large" marge de sécurité) et TL (pour "Très Large"). Elles s'écrivent encore SM_i avec $i=1,..,5$. L'ensemble des fonctions

d'appartenance est présenté sur la figure 4.31

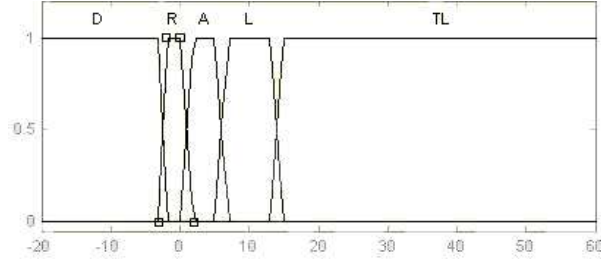


FIG. 4.31: Fonctions d'appartenance associées à la variable SM

On souhaite souligner la prise en compte des situations dans lesquelles on est déjà dans une situation d'insécurité pour définir comment on peut l'améliorer. Elle est nuancée en distinguant entre la situation où on est vraiment à une distance très insuffisante et la situation où on commence à peine à entrer dans ce type de situation.

Le changement de vitesse du véhicule suivi (en km/h) est la troisième entrée I_3 . Δv_{PV} est la variable floue associée. Elle est caractérisée par sept fonctions d'appartenance symétriques qui représentent l'augmentation ou la diminution de cette vitesse. L'ensemble de ces fonctions est présenté sur la figure 4.32.

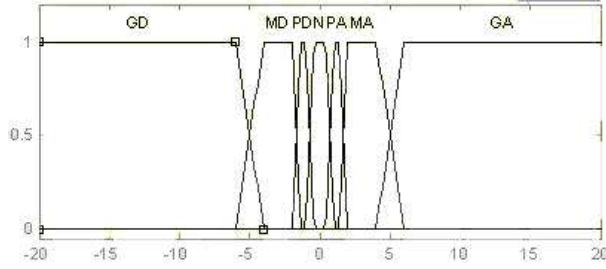


FIG. 4.32: Fonctions d'appartenance associées à la variable Δv_{PV}

La sortie $O1$ est l'amplitude maximale de la variation de la vitesse du véhicule suiveur lui garantissant le respect de la distance de sécurité. Elle est définie par cinq fonctions d'appartenance nommées "Décélération", "Nul", "Petite accélération", "Moyenne Accélération", "Grande Accélération". Sous une forme plus compacte, elles s'écrivent Δv_{FVi} avec $i=1,\dots,5$.

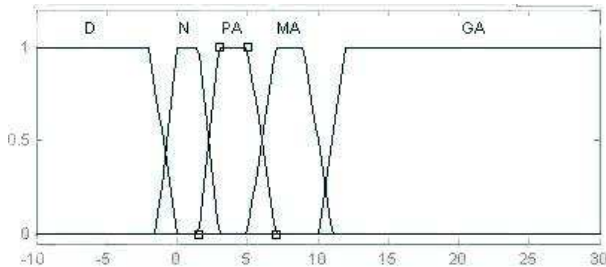


FIG. 4.33: Fonctions d'appartenance associées à la variable de sortie

Une fois l'univers de discours et les fonctions d'appartenances définis, examinons maintenant l'ensemble des règles qui alimente le moteur d'inférence.

Base de règles

Avec les trois entrées et une seule sortie, la forme générale des règles d'inférence est :

"Si $I1 = \Delta v_i$ et $I2 = SM_i$ et $I3 = \Delta v_{FV}$ alors $O1 = \Delta v_{FV_i}$ "

Un exemple de ces règles en langage naturel est :

"Si le véhicule suivi est Plus Rapide que le véhicule suiveur et la marge de sécurité est grande et le véhicule précédent est en phase d'accélération, alors on peut chercher la vitesse optimale dans un intervalle plus large ($O1$ est "Très Large")."

La base de règles est alors constituée d'un nombre de règles assez élevé. On s'abstient ici de toutes les détailler. On se contente de détailler quelques exemples. Sur le tableau 4.5, on présente trois règles de la base.

TAB. 4.5: Exemples de règles d'inférence

Numéro de règle	Si Δv	Et SM	Et Δv_{pv}	Alors Δv_{fv}
1		D		D
2	BPR	A	GD	N
3	MV	TL		GA

La règle 1 correspond au cas où il y a un réel danger (la marge de sécurité est très négative) et où il faut inciter le conducteur à ralentir, d'où le D de décélération pour la sortie.

La règle 2 correspond à un cas où la distance de sécurité est respectée. Le véhicule précédent roule beaucoup plus vite que le notre mais il est en forte décélération. Ce qui explique que la vitesse optimale sera recherchée autour de notre vitesse actuelle (la sortie est dite " nulle ").

La règle 3 montre un cas où les deux véhicules roulent à la même vitesse mais sont très distants l'un de l'autre. Sans regarder la tendance du véhicule précédent, la marge de sécurité étant importante, on se permet de rechercher la vitesse optimale dans un intervalle qui lui permettrait d'être bien plus élevée que la vitesse actuelle (en restant dans la limite de la vitesse autorisée).

Il nous reste alors à définir les opérateurs utilisés pour la fuzzification, la défuzzification et le système d'inférence.

Opérateurs flous

Pour notre application, les opérateurs les plus classiques sont utilisés. L'opération min-max est utilisé pour les opérateurs ET et OU. La défuzzification par centre de gravité est utilisée pour calculer la valeur numérique de la sortie floue.

Conclusion

On a présenté sur les paragraphes ci-dessus une approche par la logique floue pour résoudre le problème lié à la distance de sécurité. Le contrôleur floue a été implanté grâce à une Toolbox du logiciel Matlab. Cela nous a permis de faire des simulations pour ajuster les paramètres du contrôleur. On s'accorde pour conclure que la mise en œuvre d'un contrôleur flou est relativement facile mais que le réglage des paramètres reste une étape très délicate. Le module a été réglé pour

le contexte d'un véhicule léger. Pour d'autres contextes, il faut réajuster ces paramètres. Ainsi, pour ce type de système, il n'existe pas une configuration optimale facilement adaptable. C'est pour cela, qu'on s'est contenté d'avoir un module qui fournit des résultats cohérents sans trop chercher à l'optimiser ou à étudier l'influence de ses différents paramètres (la forme et le nombre des fonctions d'appartenances, les différents opérateurs,...).

Passons maintenant aux résultats de simulations de notre système avec l'intégration du module que nous venons juste de présenter.

4.4 Validation de la stratégie développée : cas d'un système actif

4.4.1 Conception d'un système actif

Jusqu'à maintenant, nous avons présenté les différentes étapes utilisées pour concevoir la stratégie de calcul des consignes optimales. On propose d'évaluer les consignes calculées par des simulations. Comme on ne dispose pas de simulateurs, on étudie le cas d'un système actif [LNM10d]. On rentre alors dans le cadre d'une conduite autonome pour le véhicule suiveur. Pour cela, le modèle longitudinal du véhicule présenté dans le chapitre 2 est utilisé. En supposant qu'une boîte de vitesse automatique est utilisée, on s'intéresse alors au problème du suivi de vitesse optimale par l'automate. Une loi de passage simple est utilisée pour interpréter une vitesse de consigne en un enfoncement pédale de consigne pour le moteur. La figure 4.34 présente le schéma d'un système en boucle fermée. L'automate remplace donc le rôle du conducteur.

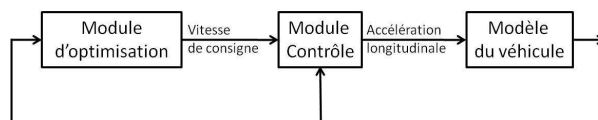


FIG. 4.34: Schéma complet d'un système actif

Sur ce schéma, on voit que le module d'optimisation fournit des consignes de vitesse optimale. Le module contrôleur va essayer de commander le véhicule de façon à suivre ces consignes. Il s'agit donc d'un cas d'étude simple. Pour contrôler le véhicule, deux méthodes de commandes sont examinées. Premièrement, on a utilisé un correcteur PID classique. Les performances de contrôleur sont encourageantes. Cependant, cette méthode n'est pas robuste et demande des réglages à chaque modification des paramètres du module du véhicule. On s'intéresse alors à une deuxième commande plus robuste. Il s'agit de la commande par modes glissants. Cette technique, assez simple à mettre en oeuvre, a été déjà implantée avec succès dans un véhicule prototype du LIVIC dans le cadre de thèse de Nouvelière [Nou02, NM07] et a démontré d'une meilleure robustesse dans nos simulations. On présente dans la suite de ce paragraphe quelques résultats de simulation avec ces deux lois de commande. Ce paragraphe présente une première réflexion sur la construction d'un système actif mais le but principal est d'obtenir un véhicule capable de suivre les consignes données pour qu'on puisse réaliser les simulations nécessaires à la validation du concept proposé. On ne détaillera donc pas forcément les différents techniques utilisées. À travers cette courte étude, on obtient un premier élément de réponse concernant le caractère de faisabilité des consignes optimales.

PID

Les correcteurs PID sont les premiers recours envisagés quand on a à résoudre un problème de commande en boucle fermée. Dans notre étude, il s'agit donc d'un correcteur PID classique écrit sous la forme :

$$C = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i} p\right) \frac{1 + aT_d p}{\sqrt{a}(1 + T_d p)} \quad (4.21)$$

avec K_c le gain du correcteur, T_i la constante d'intégration et T_d la constante de dérivation. Les paramètres du correcteur sont réglés avec le modèle du véhicule Renault Laguna présenté dans le chapitre 2 et dans les annexes. Les performances de ce correcteur sont présentées sur la figure 4.35 et sur le tableau 4.6. La figure 4.35 montre que la vitesse du véhicule contrôlé suit très bien la vitesse de consigne. Les deux courbes sont presque superposées. Le tableau 4.6 représente les erreurs de poursuite. On définit $\epsilon_v = v_{\text{commandé}} - v_{\text{consigne}}$ où $v_{\text{commandé}}$ est la vitesse du véhicule contrôlé et v_{consigne} la vitesse de consigne. Dans cet exemple, le correcteur donne des

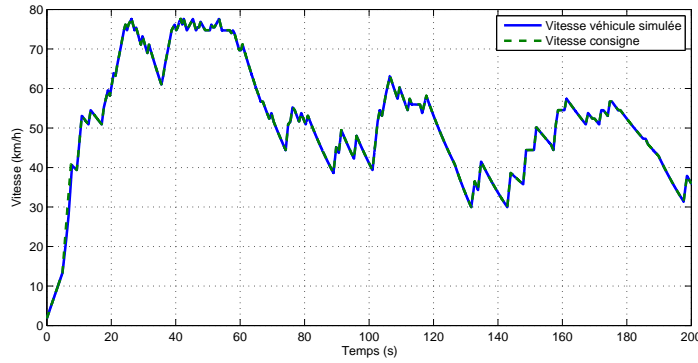


FIG. 4.35: Résultats avec le correcteur PID

TAB. 4.6: Performances du correcteur PID

ϵ	$\frac{\text{mean}(\epsilon_v)}{\text{max}(v_{\text{consigne}})}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_v)}{\text{max}(v_{\text{consigne}})}$
$\epsilon(\%)$	0.84	9.0

résultats très encourageants. Cependant, comme on l'a souligné, l'inconvénient majeur de cette approche est le manque de robustesse. À chaque changement de paramètres du véhicule, on doit recommencer les réglages du correcteur. On souhaite donc avoir une commande plus robuste. On propose d'étudier la commande par modes glissants.

Commande par modes glissants

Les éléments théoriques de cette commande sont donnés en annexe. On présente dans ce paragraphe l'application de cette technique à notre cas d'étude. La commande par modes glissants d'ordre 1 a été utilisée avec la formulation suivante de la commande :

$$u = u_{\text{equ}} - k \cdot \text{sign}(S) \quad (4.22)$$

où S est la surface de glissement, u_{equ} est la commande équivalente obtenue par la résolution de l'équation

$$\dot{S} = 0 \quad (4.23)$$

et k est le gain à régler.

La première manière de choisir la surface de glissement est d'utiliser les vitesses. La fonction de surface de glissement s'écrit $S = x - x_{opt}$, où x_{opt} est la position du véhicule correspondant à la vitesse v_{opt} fournie par le module d'optimisation. En choisissant cette stratégie, le contrôle est juste la vitesse du véhicule. On sait qu'avec la commande d'ordre 1 du mode glissant, on risque d'avoir le problème de réticence. Cela signifie qu'il existe des oscillations sur la commande de vitesse en entrée. Cette oscillation va être amplifiée en dérivant la vitesse pour obtenir l'accélération du véhicule. Dans ce cas, on risque d'avoir des accélérations importantes et brutales, ce qui rend inconfortable la conduite.

Pour résoudre ce problème, on a choisi comme entrée de commande l'accélération a avec la surface de glissement qui s'écrit $S = v - v_{opt}$. Le problème de réticence existe toujours mais on aura une vitesse plus douce en intégrant l'accélération. Ce qui est plus confortable pour le conducteur.

Finalement, la commande s'écrit :

$$a = a_{opt} - k.sign(v - v_{opt}) \quad (4.24)$$

Dans le cas de cette commande, il faut traduire une commande en accélération en un enfoncement de la pédale d'accélérateur. Un système du premier ordre est alors utilisé pour cette tâche.

Sur la figure 4.36, on présente la vitesse de consigne, qui est la vitesse optimale fournie par le module d'optimisation, et la vitesse du véhicule contrôlé en simulation. Les deux courbes sont superposées.

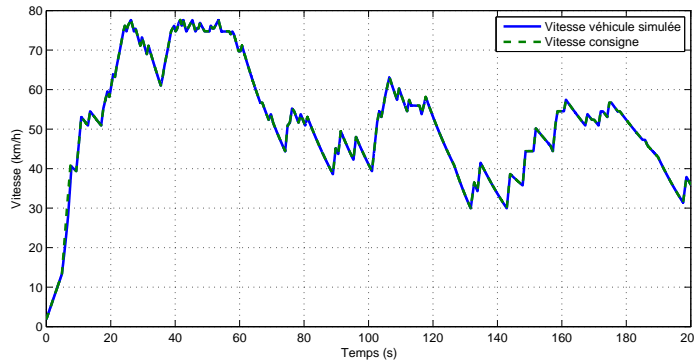


FIG. 4.36: Commande par mode glissant pour le système actif

On voit qu'on obtient un suivi de meilleure qualité en comparaison avec le cas du correcteur PID. Le suivi de vitesse est bien réalisé par le contrôleur. Les erreurs du suivi avec cette commande sont présentées dans le tableau 4.7.

On observe donc de meilleures performances dans le cas de la commande par modes glissants. Elle est ensuite utilisée pour les simulations qui suivent.

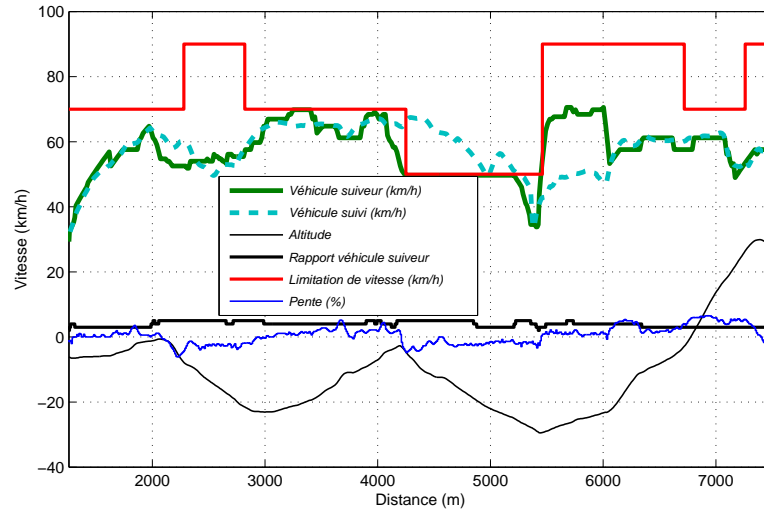
TAB. 4.7: Performances de la commande par modes glissants

ϵ	$\frac{\text{mean}(\epsilon_v)}{\text{max}(v_{\text{consigne}})}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_v)}{\text{max}(v_{\text{consigne}})}$
$\epsilon(\%)$	0.19	7.13

4.4.2 Résultats de simulation

Pour valider le concept d'un système écologique et sûr, le profil de vitesse obtenu lors de la campagne de l'éco-conduite sur le circuit du projet ARCOS est utilisé. Il correspond à une conduite économique d'un conducteur dont la différence entre deux passages sur le même circuit est significative. Ce profil est considéré comme la vitesse du véhicule suivi. Le véhicule suiveur est donc celui d'un véhicule autonome avec la loi de commande présentée dans le paragraphe précédent. Le modèle du véhicule et la commande présentés précédemment sont utilisés pour faire suivre le véhicule suiveur la trajectoire optimale définie par le module d'optimisation. Le but de la simulation est de savoir si les consignes de sécurité sont respectées et si la trajectoire donnée par le système développé permet de réduire la consommation.

On connaît la limitation de vitesse et la géométrie de la route (la pente, le dévers, la courbure). Pour cette simulation, la vitesse à l'approche du virage est calculée simplement par le modèle (4.13). Les états des deux véhicules au début de la simulation sont respectivement $x_{FL} = 1250(m)$, $v_{FL} = 28(km/h)$, $x_{PV} = 1272(m)$, $v_{PV} = 32km/h$. À cet instant, on a une marge de sécurité de $SM = 1.44m$. Les deux profils de vitesse ainsi que les différentes informations de la route sont présentés sur la figure 4.37.


FIG. 4.37: Profil optimal avec $Q1=1$, $Q2=1$, $Q3=1$

Sur ce parcours, on remarque que les montées et les descentes sont fréquentes. Mais leurs inclinaisons ne sont pas fortes. On a une inclinaison maximale de 4 à 5% sur les sections de 1000 m à 2000 m et de 3000 m à 4000 m. On va analyser les deux profils sur les deux aspects

liés à la sécurité et à l'économie de carburant. Le problème de sécurité comprend le respect de la limitation de vitesse, la vitesse maximale à l'approche du virage et la distance de sécurité. L'économie de carburant est liée au comportement du véhicule en fonction de la géométrie de la route. Nous allons voir que dans certains cas, ces deux aspects maintiennent un lien très étroit.

La limitation de vitesse

Le parcours simulé contient différentes limitations de vitesses. Elles sont toutes respectées par le véhicule suiveur et dans la plupart du temps par le véhicule suivi. En effet, dans l'intervalle entre 4200 m et 5200 m où la limitation de vitesse change de 70 km/h à 50 km/h, le véhicule précédent a un dépassement de vitesse très importante et sur une longue distance. Ce qui peut engendrer une situation d'insécurité. C'est la première amélioration que notre système peut apporter au conducteur.

La distance de sécurité

Elle est gérée par le contrôleur de la logique floue. Deux petits rappels concernant l'approche retenue :

- On ne cherche pas à maintenir une distance constante entre les véhicules.
- La marge de sécurité ne doit pas être dans la zone critique.

Pour mieux analyser le problème, on présente sur la figure 4.38 la marge de sécurité entre deux véhicules.

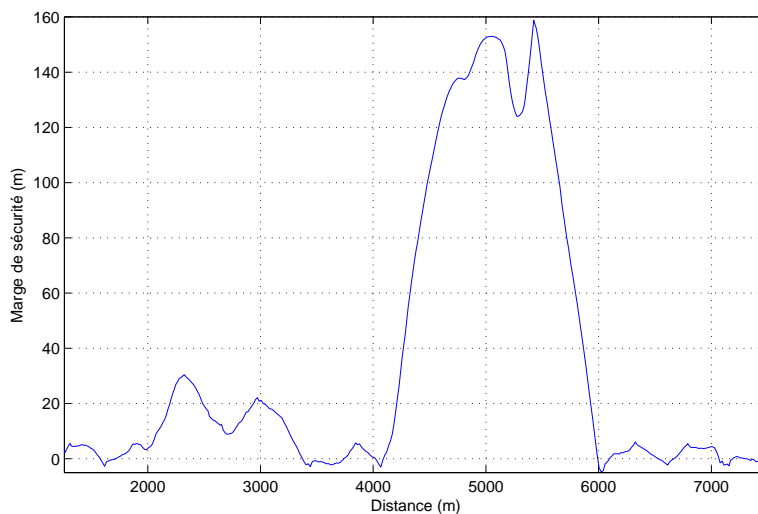


FIG. 4.38: Marge de sécurité avec $Q1=1$, $Q2=1$, $Q3=1$

Au début, la distance entre les deux véhicules est de 20 m. Avec une vitesse du véhicule suiveur de 28km/h , la marge de sécurité est de 1.44 m. Ce qui signifie qu'on est dans une situation de sécurité. Cependant, une grande différence d'accélération entre deux véhicules peut faire entrer le véhicule suiveur dans une situation d'insécurité. Ce qui explique le fait qu'il y ait très peu de différence de vitesse entre les véhicules au début du parcours. Quand on commence à aborder le descente à la distance 2100 m, on est toujours dans une situation de sécurité avec la marge proche de zéro. Dès lors, pour réduire la consommation, le véhicule suiveur commence à décélérer puis maintenir une vitesse constante moins élevée le long de la descente. Cela a pour

conséquence qu'il est distancé par le véhicule précédent. On constate alors que la marge de sécurité augmente. Cette situation montre aussi que la vitesse du véhicule précédent n'est pas forcément la vitesse optimale. Dans ce cas, le maintien d'une distance de sécurité constante n'est pas forcément la meilleure solution pour consommer le moins. Par la suite, comme la marge de sécurité est suffisante, le véhicule suiveur a pu suivre sa trajectoire optimale tout en respectant la distance de sécurité. Cette contrainte est toujours respectée tout le long du trajet.

L'économie de carburant et le problème de sécurité

On constate que dans la zone où a lieu le changement de la limitation de vitesse, la marge de sécurité devient très élevée ce qui est prévisible. Le véhicule suiveur respecte la limitation de vitesse imposée, ce qui n'est pas le cas du véhicule précédent. On observe quand même sur les données que la vitesse du véhicule qui précède reste basse, peut-être à cause d'un véhicule qui lui précède. Le véhicule suiveur adopte quant à lui une vitesse plus élevée qui correspond à sa vitesse optimale en terme d'économie de carburant. Quand la situation de sécurité ne le lui permet plus, une nouvelle solution est trouvée pour répondre aux contraintes de sécurité tout en essayant de minimiser la consommation. Dans tous les cas, on voit que le critère de sécurité est toujours assuré et reste prioritaire.

On trouve qu'il existe des moments où la marge de sécurité est très élevée. Ce qui signifie que les deux véhicules sont très éloignés l'un de l'autre. Donc leur temps de parcours sont différents. Mais à la fin de la simulation, cette marge est proche de zéro. Dans ce cas, les temps de trajet des deux véhicules sont sensiblement les mêmes. On a supposé que les véhicules ont les mêmes caractéristiques. Le modèle de consommation est utilisé pour évaluer la consommation de ces deux véhicules sur cette simulation. On a une légère baisse de consommation de l'ordre de 2.4% du véhicule suiveur par rapport au véhicule suivi. Ce qui reste modeste mais acceptable dans le contexte où les contraintes de sécurité sont respectées.

Notre conclusion est la suivante : **"Accélérer et décélérer au bon moment et au bon endroit peut permettre d'avoir une conduite plus sûre, plus économique avec le même temps de trajet. Le système peut aider le conducteur à adopter ce type de pratiques"**.

Il reste alors à la vérifier dans des situations réelles.

4.5 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre les différentes étapes de conception d'un système d'aide à la conduite sûr et efficace. On a commencé par résoudre un problème multi-objectifs qui nous permet de mettre en évidence le compromis entre le temps de trajet, la consommation et le confort des occupants. On a aussi montré les gains potentiels en économie de carburant d'une conduite écologique.

La deuxième partie a présenté une approche de calcul en ligne. Pour cela, différentes techniques sont utilisées pour réduire le temps de calcul de la programmation dynamique. Cette approche permet de construire un système écologique plus interactif par rapport à la situation de conduite. Ceci permet par la suite d'aborder les différents problèmes liés à la sécurité.

L'extension du problème de réduction de consommation de carburant à un problème écologique et sécuritaire permet de construire un système global. Les résultats de simulation montrent qu'il existe toujours un potentiel de réduction de consommation de carburant. Mais ce gain dépend fortement du contexte dans lequel se trouve le véhicule.

Par rapport aux concepts existants, le concept proposé dans ce mémoire, permet à la fois de

réduire la consommation de carburant mais aussi d'améliorer la sécurité du conducteur. Selon nous, ces deux aspects doivent être traités ensemble pour pouvoir construire un système d'aide qui peut être adopté par les conducteurs. Les tests sur des conditions réelles de circulation est le meilleur moyen de confirmer cette hypothèse.

Chapitre 5

Expérimentation

Sommaire

5.1	Interface Homme-Machine (IHM)	116
5.1.1	Analyses des informations pertinentes	116
5.1.2	Évolutions des versions de l'interface	118
5.1.3	Gestion de l'interface	121
5.1.4	Conclusion	122
5.2	Mise en place de l'expérimentation	122
5.2.1	Équipements du véhicule	122
5.2.2	Présentation des pistes	124
5.2.3	Implantation	126
5.3	Campagnes d'évaluation du système	130
5.3.1	Objectifs	130
5.3.2	Organisation	130
5.3.3	Déroulement des tests	131
5.4	Résultats et analyses	132
5.4.1	Scénario 1 : circulation libre	134
5.4.2	Scénario 2 : circulation contrainte par un véhicule précédent	140
5.4.3	Scénario 2 : discussions sur la vitesse en virage et la distance inter-véhiculaire	144
5.4.4	Conclusion	148

On a prouvé, à travers les simulations des chapitres précédents, le gain potentiel d'économie de carburant d'un système d'aide à la conduite écologique et sécuritaire. Mais on ne connaît pas encore son gain effectif, une fois implanté. En effet, le conducteur n'obtient l'économie de carburant annoncée que s'il suit exactement les trajectoires optimales qui lui sont indiquées. Ce gain demeure possible avec un véhicule automatisé mais ne devrait pas être le cas pour un conducteur seul. Dans le même temps, les trajectoires optimales déterminées seront-elles acceptées et faciles à suivre ? De plus, ces consignes améliorent-elles vraiment la conduite en termes de confort, de sécurité et de consommation ? La phase d'expérimentation décrite dans ce chapitre tente de répondre à ces questions.

On débute ce chapitre par le développement de l'interface entre le conducteur et le module de calcul du système. Il est suivi par la présentation de la mise en place de l'expérimentation avec la présentation des équipements et l'architecture du système embarqué sur un véhicule d'essais. Deux campagnes de tests sont ensuite résumées. Finalement, on clôt le chapitre avec

des discussions sur le gain de carburant induit par le système et son acceptabilité et quelques conclusions.

5.1 Interface Homme-Machine (IHM)

Le dialogue entre le module de calcul et le conducteur est effectuée via une interface visuelle sur un écran de type système usuel de navigation. La conception de cette interface se révèle essentielle au bon déroulement des tests. Une interface bien conçue permet au conducteur de suivre facilement les consignes et améliore l'efficacité du système global. Dans le même temps, elle permet de confirmer ou d'infirmer le choix retenu pour la stratégie.

Dans le chapitre portant sur l'état de l'art, nous avons présenté trois systèmes d'aide à la conduite avec leurs interfaces associées. Nous avons fait remarquer que les deux interfaces créées par les constructeurs sont très réussies en terme d'ergonomie. Celle proposée par Vandervoort est beaucoup plus intuitive en termes de graphiques et d'information fournies. Comme chaque interface est plus ou moins liée à la stratégie utilisée, et que nous manquons d'informations sur celles-ci, nous avons préféré opter pour le développement d'une nouvelle interface.

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas l'ambition de créer l'interface la plus innovante et la plus attrayante possible. On se concentre plutôt sur l'essentiel qui consiste à en créer une qui mette en valeur notre méthodologie. Dans le même temps, elle doit rester simple, claire, compréhensible par le conducteur et adaptée au matériel dont on dispose. Pour cela, la démarche présentée sur la figure 5.1 est adoptée.

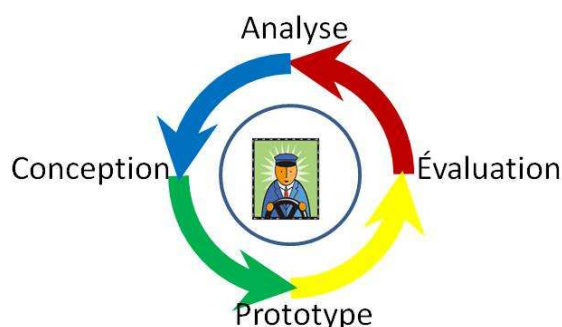


FIG. 5.1: Cycle de développement de l'IHM

Après avoir analysé les informations pertinentes que l'on souhaite fournir au conducteur, un premier prototype est conçu. Il est ensuite évalué par les conducteurs qui sont des personnels du LIVIC. Le recueil des informations nous permettent alors de continuer à améliorer les prototypes. La version finale est celle qui répond au mieux aux attentes de la plupart des conducteurs.

5.1.1 Analyses des informations pertinentes

Les informations disponibles, à fournir au conducteur, proviennent de trois sources comme montre la figure 5.2.

Les différents capteurs qui équipent les véhicules nous permettent d'obtenir les informations sur la dynamique longitudinale (vitesse, accélération), sur la position en coordonnées GPS, sur le régime moteur (à partir duquel, on déduit le rapport de boîte utilisé) et sur la distance qui les sépare du véhicule qui précède. Du côté de l'infrastructure, la cartographie augmentée de la

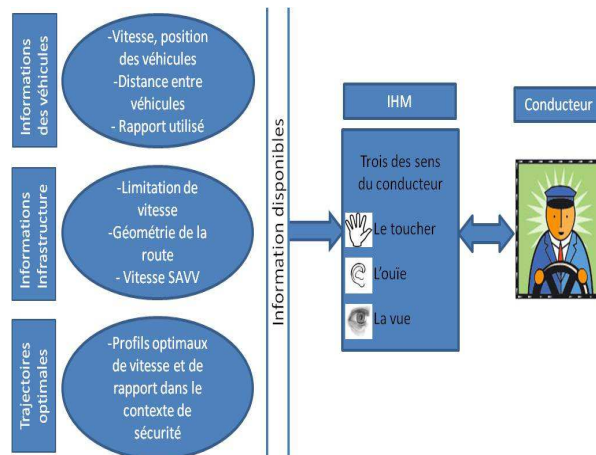


FIG. 5.2: Informations disponibles

route qui est utilisée de façon à connaître sa géométrie (pente, dévers, courbure) ; les limitations de vitesses légales et finalement le profil de vitesse en approche de virage calculé par le système SAVV du LIVIC. À partir des positions GPS des véhicules, on peut déterminer leur localisation sur cette carte numérique. La troisième source est le module d'optimisation. À chaque instant, le conducteur a alors une trajectoire optimale à suivre pour réduire la consommation et rester en sécurité.

Il est inutile de transmettre toutes ces informations au conducteur. De plus, il n'est pas non plus efficace de lui fournir des informations brutes. Dans le cadre des systèmes d'aide à la conduite, et notamment des systèmes écologiques, des études ont montré qu'il est nécessaire de fournir au conducteur le retour de l'influence de sa conduite sur la consommation et lui proposer une alternative pour la réduire. On constate que les deux variables qui sont les plus faciles à analyser par le conducteur sont la vitesse et le rapport de boîte. Ce sont donc les informations que l'on va chercher à lui transmettre de façon la plus efficace.

Si le conducteur suit exactement les consignes données, il est alors assuré d'être en sécurité dans le contexte étudié et moins énergivore. L'affichage de la vitesse et du rapport de boîte est suffisant. Mais dans le cas où les consignes ne sont pas suivies, des situations d'insécurité peuvent apparaître. Un avertissement du conducteur pour sa conduite à la fois non écologique et dangereuse doit lui être adressé. Dans le contexte de notre étude, les informations de sécurité qu'on peut adresser sont alors : le non respect de la limitation de vitesse, une distance intervéhiculaire insuffisante ou une vitesse excessive à l'approche et dans le virage. Avec la vitesse et le rapport optimaux, ces informations constituent le premier niveau d'information, d'alerte et de suggestion adressé au conducteur. On peut imaginer par la suite un deuxième niveau qui analyse des enregistrements sur le parcours et donne des conseils à la fin du parcours. Ce dernier niveau ne sera pas réalisé pour l'instant. Cela fera partie des perspectives.

Les informations nécessaires ainsi déterminées, on regarde à présent comment on peut les transmettre au conducteur. Pour cela, on peut travailler sur le toucher, l'ouïe et la vue. Examinons les avantages et les inconvénients de chaque canal de communication.

L'approche auditive permet au conducteur de percevoir rapidement l'information avec une faible probabilité d'omission par rapport à une approche visuelle. On peut utiliser dans ce cas des bips sonores et des messages vocaux. Son inconvénient majeur se situe au niveau du phénomène d'intrusion qui peut parfois se révéler trop élevé, au risque que le conducteur désactive le système.

Par conséquent, l'information donnée doit être ponctuelle pour ne pas trop le gêner.

L'approche tactile ou haptique est aussi utilisée par certains systèmes d'aide à la conduite. La vibration du volant ou du siège du conducteur permet d'avoir une demande de réaction rapide du conducteur. Dans notre cas, cette approche peut provoquer des confusions s'il n'y a pas d'information supplémentaire. Il nous semble difficile pour le conducteur de distinguer parmi "enfoncer le pédale" et "lever le pied" juste avec des vibrations sur la pédale par exemple. Sans compter le fait que ces avertissements usuels sont déjà utilisés pour d'autres fonctions.

Finalement, l'approche visuelle nous semble la plus convenable. Elle permet de fournir des informations plus riches et sa mise en œuvre est plus simple. Son plus grand inconvénient, il faut le souligner, est qu'elle attire le regard du conducteur de façon intempestive et interférante. Cela peut entraîner son inattention sur la conduite. Néanmoins, la prise en compte de certains aspects de sécurité, notamment la distance de sécurité, nous laisse espérer diminuer le risque d'accident lié à une perte de concentration provoquée par notre système. De plus, un affichage tête haute peut résoudre en partie ce problème. C'est pour toutes ces raisons qu'un affichage visuel est finalement retenu. Dans un premier temps, l'affichage se fera sur un écran de type GPS déjà disponible sur notre véhicule d'essais.

5.1.2 Évolutions des versions de l'interface

Partant de ces analyses préliminaires, un premier prototype est alors réalisé. Il est conçu avec l'utilisation de la bibliothèque Qt en C++. La description détaillée de cette réalisation est donnée en Annexe A.5. On s'intéresse d'abord à la manière de fournir des consignes sur la vitesse et le rapport de boîte. La première version de l'interface (figure 5.3) est alors très simple. La

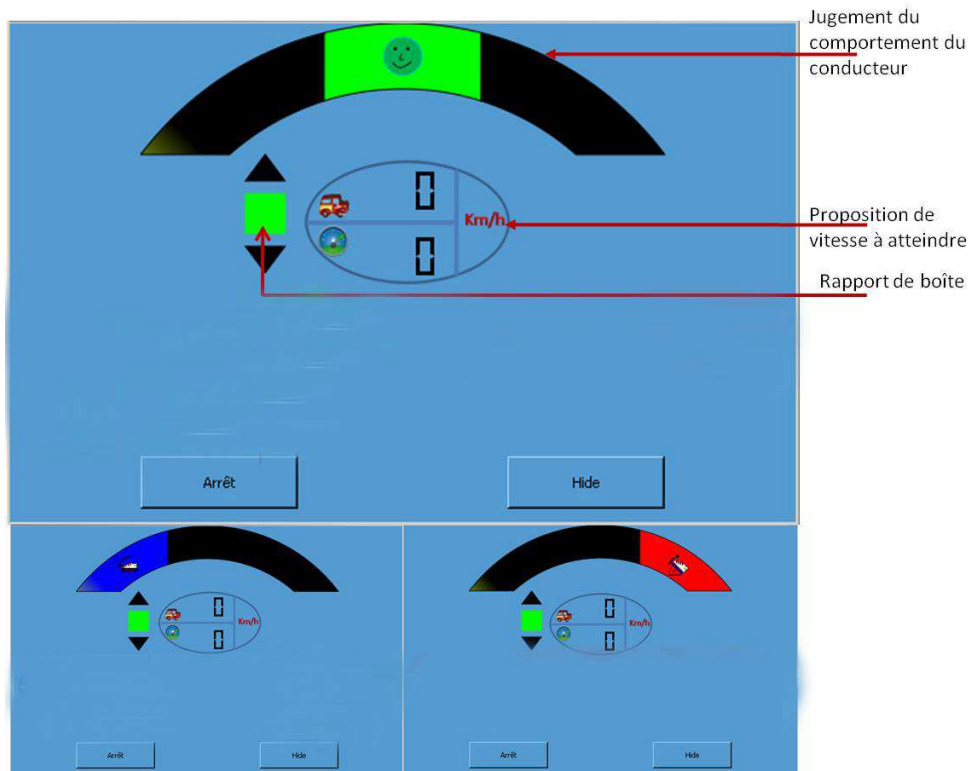


FIG. 5.3: Première version de l'IHM

première partie permet d'avoir un aperçu du comportement du conducteur à l'instant présent. Il est constitué de trois arcs. Le plus à gauche signifie que la vitesse actuelle du véhicule est en dessous de la vitesse optimale. Celui du milieu montre que le conducteur évolue à la bonne vitesse. Le plus à droite indique que la vitesse actuelle est plus élevée que la vitesse optimale. L'interface donne donc au conducteur un retour immédiat quant à son comportement. Pour éviter des changements fréquents sur les états des arcs, un intervalle aux alentours de la vitesse optimale est défini. Dans le même temps, le code couleur suivant est utilisé.



FIG. 5.4: Code des couleurs utilisé pour l'IHM (la différence de vitesse est en km/h)

Si la différence entre la vitesse optimale et la vitesse actuelle reste dans l'intervalle défini, l'arc au milieu s'allume avec une couleur verte. Dans les deux autres cas, le rouge et le bleu sont utilisés.

Ensuite, on propose au conducteur la vitesse à atteindre. Le compteur supérieur indique la vitesse actuelle du véhicule et le compteur inférieur la vitesse optimale en termes d'économie de carburant dans un contexte de sécurité.

À gauche de ces indicateurs apparaît le module de rapport de boîte. Si le carré central est éclairé en vert, c'est que l'on est sur le bon rapport, si la flèche supérieure s'allume, on doit passer le rapport supérieur et si la flèche inférieure s'allume, il faut rétrograder.

Après un petit sondage réalisé au sein du LIVIC, il semblerait que l'affichage dans le module supérieur ne soit pas instinctif. Le fait que l'on éclaire alternativement la partie gauche puis droite ne serait pas du goût de la plupart des gens. De plus, il y a confusion entre la vitesse optimale et la vitesse du véhicule. Sans compter que la vitesse optimale n'est pas assez visuelle pour être suivie correctement.

Après plusieurs prototypes, présentés dans l'annexe A.5, on arrive à une version qui semble satisfaire la plupart des conducteurs interrogés. Si on utilise toujours le même principe pour le rapport de boîte, un retour vers un simple compteur de vitesse semble apprécié par les conducteurs.

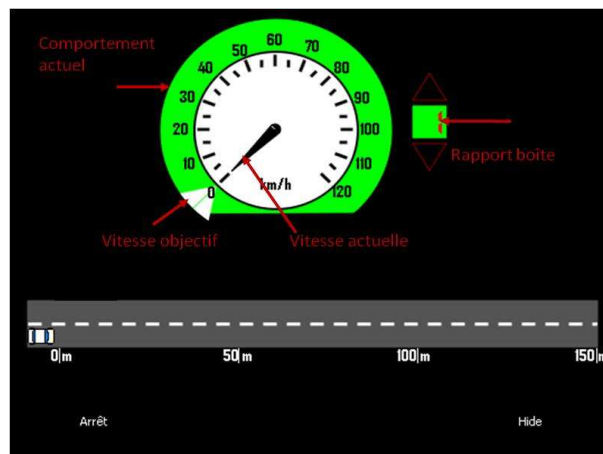


FIG. 5.5: Version évoluée de l'IHM

Dans cette version, on retrouve la vitesse actuelle du véhicule qui est présentée par l'aiguille

noire. Le contour du compteur de vitesse est utilisé pour fournir le retour sur la conduite actuelle du conducteur. Le même code couleur est utilisé avec en plus un effet dégradé pour donner une information plus quantitative. Le triangle blanc est alors la consigne à atteindre. Du côté du rapport de boîte, le rapport actuel est affiché dans le petit carré. Avec cette version, on peut à la fois donner au conducteur un retour immédiat sur la conduite et proposer la vitesse et le rapport à atteindre. Cette version satisfait alors notre premier objectif.

Ensuite, les informations de sécurité nous semblent aussi nécessaires pour montrer au conducteur que les consignes données sont fiables. Pour cela, on a ajouté le panneau de signalisation reflétant une indication quant à la vitesse légale sur le compteur de vitesse. Celui-ci peut être remplacé par le panneau de signalisation de vitesse limite en abord de virages si ce cas apparaît. Un parcours de 150 m est alors reconstruit, en bas d'écran, avec au début du trajet le véhicule suiveur. Le véhicule précédent est à la position qui correspond à la distance qui les sépare. Avec l'affichage de la distance de sécurité par les deux traits parallèles, on fournit au conducteur une information sur le contexte de sécurité dans lequel il se trouve. Dans le cas où le véhicule commence à être trop près du véhicule précédent, un panneau d'alerte apparaît accompagné d'un bip sonore. Cette version est présentée sur la figure 5.6.

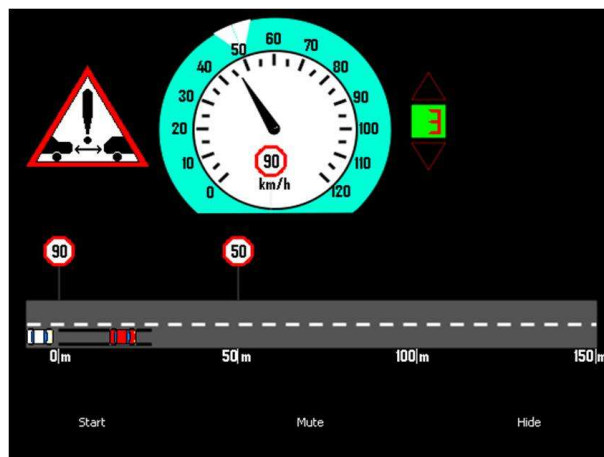


FIG. 5.6: Version finale de l'IHM

Cette capture est réalisée sur un scénario où le problème de la distance de sécurité n'est pas pris en compte. Sur la figure, on voit que les deux véhicules ne sont pas à la bonne distance de sécurité. La consigne donnée demande au conducteur d'accélérer, ce qui n'est pas du tout cohérent dans cette situation. Avec la prise en compte du problème de la distance de sécurité, on évite ce type d'incohérence qui peut faire perdre la confiance du conducteur en des consignes données.

On termine cette partie par la présentation d'un aperçu des changements d'état de l'interface en fonction du comportement du conducteur et des consignes données sur la figure 5.7.

En partant de gauche à droite et de haut en bas, les situations suivantes se présentent. Dans le premier cas, la vitesse du véhicule est inférieure à la vitesse conseillée précédemment. Le contour du compteur est en bleu. La vitesse que devra atteindre le conducteur est proche de 50 km/h. Le conducteur est sur le bon rapport et il n'a pas besoin de le changer. Dans un deuxième cas, le conducteur a atteint la bonne vitesse avec le contour de vitesse en vert, mais il doit continuer à l'augmenter jusqu'à 50 km/h pour l'instant suivant. Il reste toujours sur le bon rapport de boîte. Les deux dernières situations sont celles où le conducteur commence à dépasser la vitesse

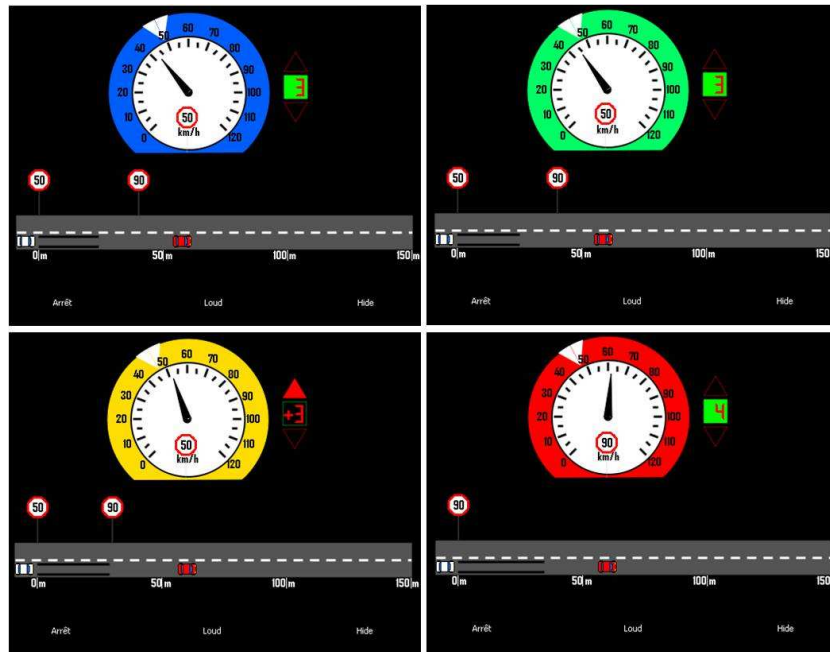


FIG. 5.7: Exemples de fonctionnement de l'IHM

optimale. Le contour devient jaune dans un premier temps et rouge dans le dernier cas en fonction de l'écart entre la vitesse conseillée et la vitesse du véhicule. Entre ces cas, il y a une demande de changement de rapport de boîte.

Ces différents contextes présentent des situations normales de fonctionnement de l'interface. Mais dans un cas de conduite réelle, différents événements qui ne sont pas pris en compte par le module de calcul peuvent rendre les consignes affichées sur l'interface incohérentes. Il est alors nécessaire de disposer d'une gestion de l'interface pour ces situations.

5.1.3 Gestion de l'interface

Dans nos méthodes de calcul des trajectoires optimales, on n'a pas tenu compte de tous les événements possibles sur la route. Ce sont entre autres, les carrefours, les feux, des intersections, les panneaux de signalisation,... Pour certains cas, notamment le signal d'arrêt, l'intégration de cet événement ne pose pas de problème particulier car il s'agit d'atteindre une vitesse nulle après un certain temps. Mais pour les autres, notamment l'approche d'un feu, cela devient très complexe et demande qu'une communication infrastructure-véhicule soit établie. Ceci n'est pas prévu dans le cadre de notre étude. Pour éviter de donner des consignes contradictoires, on a décidé de gérer ces situations via l'interface.

En effet, à une certaine distance de l'événement, la recherche des trajectoires optimales sera arrêtée et l'interface sera désactivée. À ce moment, c'est le conducteur qui décide les actions adéquates en fonction de la situation. Une fois cet événement franchi, les calculs reprennent automatiquement et le conducteur peut profiter à nouveau des consignes via l'IHM sans avoir à réactiver l'interface.

Pendant la désactivation de l'interface, un message expliquant la raison sera affiché sur l'écran (figure 5.8).



FIG. 5.8: Exemple de message lors de la désactivation de l'IHM

5.1.4 Conclusion

On a présenté dans cette section l'interface du système d'aide à la conduite développé. Elle présente à la fois des informations pour réduire la consommation mais aussi pour améliorer la sécurité. Ce qui représente la stratégie qu'on a mise en place. Suite à de nombreuses consultations et tests sur véhicule, cette interface semble être appréciée par la plupart des conducteurs. Comme on l'a souligné, on peut ajouter une deuxième couche qui permet d'avoir un résumé du parcours effectué ainsi que du gain effectif réalisé. Cela fait partie des améliorations possibles du système.

Dans la suite de ce chapitre, la mise en place de l'expérimentation est présentée.

5.2 Mise en place de l'expérimentation

Cette section décrit la mise en place des tests du système d'assistance à la conduite. On présente tout d'abord les équipements des véhicules. Ensuite, les circuits de tests avec leurs caractéristiques sont détaillés.

5.2.1 Équipements du véhicule

Dans le cadre des tests, seuls deux véhicules sont utilisés. Le premier est une Renault Clio Eco 2. Le deuxième est équipé d'un système wifi et d'un récepteur GPS. La figure 5.9 présente les différents équipements qui y sont intégrés.

Sur chacun des véhicules, on dispose d'un ordinateur de bord sur lequel les différents processus vont être exécutés. Dans le cas du véhicule suivi, l'ordinateur est utilisé pour recevoir et transmettre sa position GPS, sa vitesse longitudinale, son accélération et sa distance parcourue grâce aux mesures de l'odomètre du véhicule suiveur. Ce dernier utilise l'ordinateur de bord pour gérer tous les processus d'acquisitions de données, de recherche de la position des véhicules sur la carte numérique, de calcul des trajectoires optimales et de transmission des consignes au conducteur via l'Interface Homme-Machine. Le transfert d'informations entre les deux véhicules se fait par un canal de connexion Wifi. Chaque véhicule dispose d'un récepteur GPS. L'algorithme de Mapmatching, implémenté sur l'ordinateur de bord du véhicule suiveur, détermine, à partir des coordonnées GPS, la position de chaque véhicule sur la carte numérique.

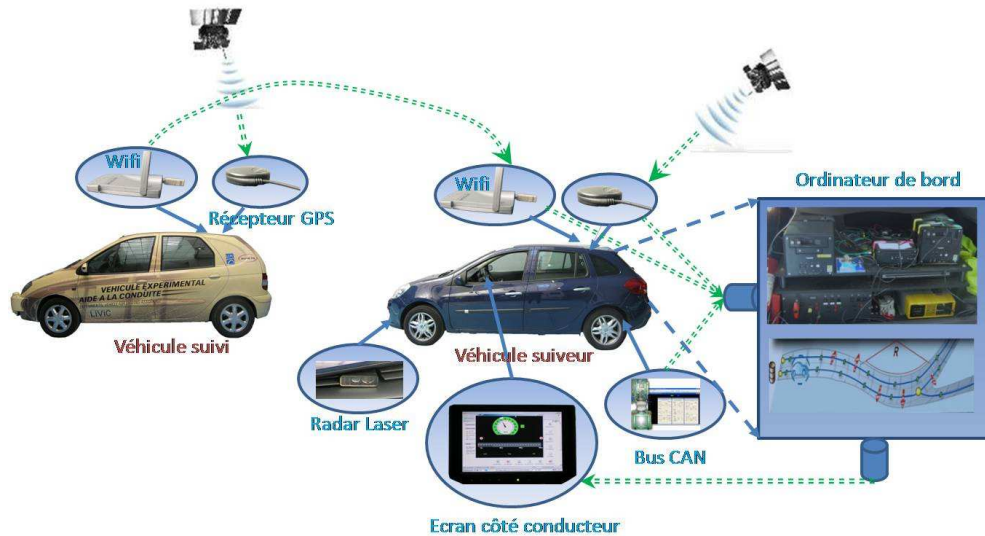


FIG. 5.9: Équipements des véhicules d'essais

Sur le véhicule suiveur, on dispose en plus d'une carte d'acquisition des données du Bus CAN. Ces informations sont nombreuses. Parmi elles, on a la vitesse et l'accélération du véhicule, la distance parcourue et le régime moteur. Le rapport de boîte engagé, quant à lui, est reconstruit à partir de la vitesse et du régime moteur. Ensuite, on dispose d'un écran de type GPS, fixé au tableau de bord. C'est sur cet écran que les consignes vont être données au conducteur via l'IHM présentée précédemment. On dispose aussi d'un radar laser à l'avant du véhicule suiveur pour la mesure de la distance inter-véhiculaire. A partir de cette mesure, on calcule la vitesse relative entre véhicules.

On peut obtenir la distance entre les véhicules de trois façons : le radar, la position des véhicules sur la carte numérique et les valeurs des odomètres implantés sur chaque véhicule. Chacune de ces trois méthodes présentent des inconvénients importants. On a été contraint de choisir la solution qui nous a semblée la plus acceptable.

La première méthode de mesure est le radar laser installé à l'avant du véhicule suiveur. Le principe de mesure de ce type d'équipement est basé sur le temps séparant le départ de l'impulsion laser de la source et son retour par réflexion sur l'objet visé. Connaissant la vitesse de la lumière, la distance entre la source laser et l'objet est facilement déterminée. Dans notre application, l'objet cible est bien évidemment le véhicule précédent. Sur une route plane et droite, la précision de cette mesure est largement suffisante pour notre étude. Néanmoins, la précision de la mesure se dégrade, et voire devient aberrante si ces conditions ne sont pas respectées. Quelques exemples sont donnés sur la figure 5.10 pour clarifier cet inconvénient.

Sur la figure 5.10a, on présente le cas où les deux véhicules sont dans un virage. Dans ce contexte, la valeur donnée par le radar est faussée. De même, sur la figure 5.10b, cette mesure devient aberrante dans le cas d'un dénivelé. Dans un cas, on a une distance beaucoup plus grande que ce qu'elle représente réellement. Dans d'autres, on a une distance beaucoup plus petite que la distance réelle entre véhicules. Étant données les caractéristiques du trajet (comportant plusieurs virages et de fortes pentes), cette solution n'est pas forcément utilisable.

La deuxième solution consiste à utiliser les positions des véhicules sur la carte numérique de la route. À priori, cette solution permet d'éviter les erreurs de mesure rencontrées avec l'utilisation du radar laser. Le principe consiste à déterminer les abscisses curvilignes des véhicules sur la

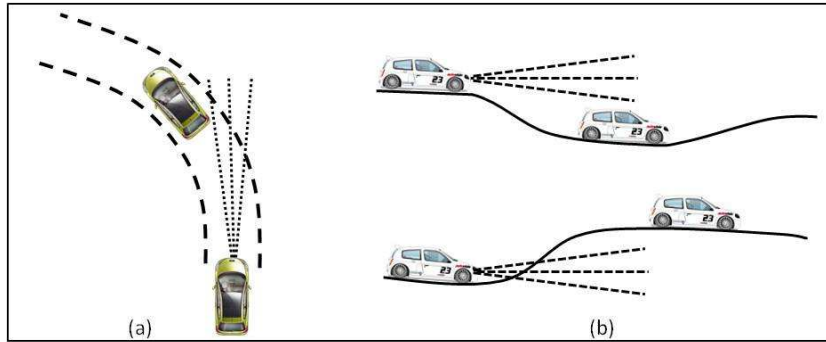


FIG. 5.10: Imprécision des mesures du radar laser dans certaines situations. (a) : Problème lié au virage (b) : Problème lié à la pente

carte numérique à partir de leurs coordonnées GPS. Connaissant la résolution de la carte, la distance intervéhiculaire est alors facilement déterminée. Cependant, cette solution présente trois problèmes. Le premier concerne la résolution de la carte. Plus la résolution de la carte est grande, plus les mesures sont précises. Le deuxième est la précision des positions du véhicule. Sans parler de la précision liée à l'algorithme du mapmatching, cette solution nécessite une localisation centimétrique des véhicules. Cette condition peut être satisfaite sur les circuits d'essais mais pas sur le trajet ARCOS qui sera présenté plus loin. Quoi qu'il en soit, le problème le plus critique concerne la période de rafraîchissement des récepteurs GPS. En effet, la période des récepteurs GPS est de 1 seconde. Ce qui signifie que l'on peut potentiellement avoir un décalage temporel légèrement inférieur à 1 seconde entre les deux véhicules. Ce qui peut induire une erreur sur la distance inter-véhiculaire de 20 m si les véhicules sont à 20 m/s.

La dernière solution consiste à utiliser les odomètres de chacun des véhicules. Ils mesurent la distance parcourue de chaque véhicule. La distance calculée entre les véhicules est basée sur la différence entre les distances parcourues et la distance inter-véhiculaire initiale. La précision et la période de rafraîchissement des odomètres sont suffisantes pour notre application. Le plus grand problème réside dans leur couplage pour mesurer la distance inter-véhiculaire. En effet, en faisant la différence des distances parcourues, on obtient seulement la distance réelle inter-véhiculaire si les deux véhicules ont suivi exactement la même trajectoire. Ce qui n'est pas forcément évident. Par conséquent, les erreurs de mesures se cumulent et deviennent significatives sur un long trajet d'une dizaine de kilomètres.

Ces limitations techniques sont les principaux obstacles pour que le système complet puisse être évalué dans une situation de circulation réelle ou sur un circuit de test avec plusieurs tours. Finalement, nous avons décidé de réaliser la campagne de tests sur un trajet d'une dizaine de kilomètres correspondant à deux tours des circuits d'essais. La mesure de la distance intervéhiculaire s'est faite avec la dernière solution. Ces tests seront présentés par la suite.

5.2.2 Présentation des pistes

Dans le cadre de la phase expérimentale, deux trajets ont été choisis pour les tests d'évaluation du système. Il s'agit des pistes d'essais situées à Versailles Satory, proches des locaux du LIVIC et d'un trajet totalisant une vingtaine de kilomètres dans les Yvelines, utilisé précédemment par le LIVIC dans des campagnes de tests en grandeur nature. Par conséquent, on dispose des cartographies précises de ces deux trajets.

Circuit Routière-Val d'Or

Les pistes d'essais sur lesquelles, de nombreux algorithmes embarqués du LIVIC sont testés se situent à proximité de ses bureaux et ateliers. Elles comprennent essentiellement 4 zones :

- Une piste de vitesse de 2 km
- Une route de type nationale, "la Routière", en anneau de 3,4 km
- Une route départementale qui forme un circuit à flanc de coline, "le Val d'Or"
- Une zone plane rectangulaire de 120x70 mètres, la "zone d'évolution"

Une vue d'ensemble des pistes est présentée sur la figure 5.11.



FIG. 5.11: Vue d'ensemble des pistes à Satory

En vue de l'évaluation du système, le trajet combinant le circuit "Val d'Or" et la "Routière" est utilisé, totalisant une distance de 5.5 km. La carte numérique de ce trajet est construite grâce aux passages du véhicule instrumenté d'analyse des itinéraires (VANI), développé et géré par le laboratoire CETE à Lyon [CCD10]. La résolution de la carte est de 5m. Pour chaque point de mesure du trajet, on dispose des coordonnées GPS en 3D, la pente, le dévers et le rayon de courbure. Pour concevoir le scénario de test, on a défini les différentes zones de limitation de vitesse tout au long du trajet. Elles sont présentées sur la figure 5.12.

À la sortie du circuit Val d'Or, on a défini un panneau "Cédez passage" par mesure de sécurité et aussi pour vérifier la gestion de l'IHM comme présentée précédemment en paragraphe 5.1.3.

Ce trajet présente à la fois une typologie de route départementale avec des rayons de courbures allant de 30 m à 600 m et un parcours avec de fortes pentes et des virages à faibles courbures. Sur l'ensemble du trajet, la pente est faible (inférieure à 2%), à l'exception de la section entre 2500 m et 3000 m où les pentes sont très importantes, allant jusqu'à 15%. Ce qui le rend très intéressant à étudier.

Circuit Arcos

Le nom du circuit est emprunté au projet français ARCOS (Action de Recherche sur la COnduite Sécurisée), qui a fait partie des travaux de recherche conduits par le LIVIC dans le cadre du PREDIT II (Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres). Ce trajet est de type inter-urbain, plutôt rural. D'autres expériences qui y ont été déjà réalisées, notamment une expérience sur l'éco-conduite, nous permettent d'avoir une base de données riche pour les analyses. Cette bonne connaissance du trajet est aussi un atout considérable pour

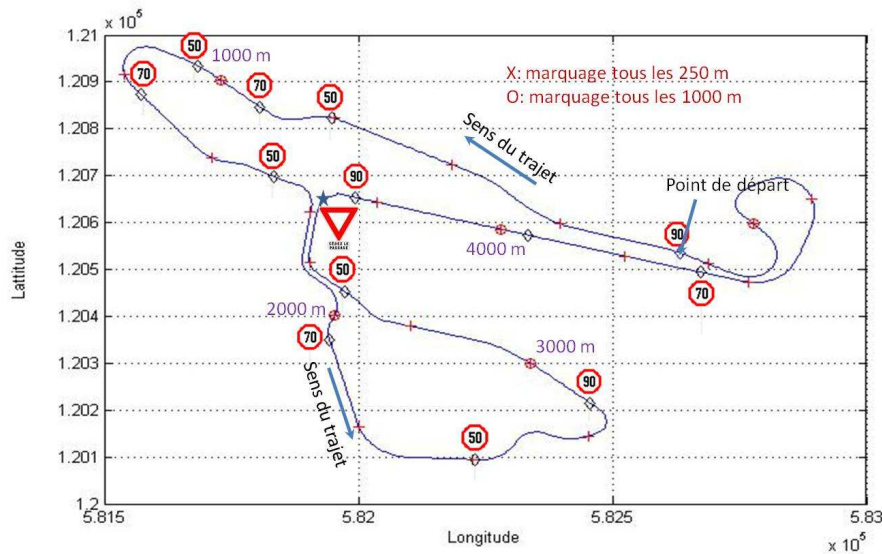


FIG. 5.12: Circuit Routière-Val d'Or

faciliter la mise en œuvre de l'expérience future. L'ensemble du trajet est présenté sur la figure 5.13.

Ce trajet totalise une distance de 18km. Il présente des situations de conduites très variées. Les limitations de vitesses varient entre 30 km/h et 90 km/h. Une grande partie de la route se situe dans la campagne avec des descentes et des montées significatives. La partie en ville présente des situations d'arrêts assez fréquents. La transition entre ces deux parties présentent des virages serrés.

Le passage du véhicule VANI au cours du mois d'août 2010, nous a permis d'actualiser les informations de l'infrastructure du circuit. La carte numérique a pu être reconstruite avec une plus grande précision. La résolution de la carte est désormais de 1 m. Elle contient donc pour chaque point de mesure les coordonnées GPS, la pente, le dévers, l'adhérence de la route, le rayon de courbure, et la limitation de vitesse.

Cependant, seulement quelques tests de fonctionnement du système ont pu y être réalisés. Ce point sera détaillé plus loin.

5.2.3 Implantation

Au cours de la démarche de développement du système, les phases de conception et de validation du concept ont été réalisées dans l'environnement Matlab/Simulink. La boîte à outil Logique Floue de Matlab a été utilisée pour concevoir et réaliser le contrôleur de logique floue gérant le problème lié à la distance entre véhicules. Pour la phase de tests sur véhicule prototype, la transformation de l'ensemble des fonctions en code C/C++ a été nécessaire. Examinons tout d'abord l'architecture logicielle retenue pour le système.

Architecture logicielle

Notre stratégie consiste à résoudre, de façon périodique, un problème d'économie de carburant et d'amélioration de la sécurité défini par les différents paramètres liés au véhicule, à



FIG. 5.13: Circuit ARCOS

l'infrastructure et aux conditions de trafic. À chaque période, la résolution de ce problème est réalisée suivant les quatre étapes présentées sur la figure 5.14.

Il s'agit alors d'acquérir les données, de définir le contexte du problème d'optimisation, de le résoudre et finalement d'envoyer des consignes au conducteur via l'IHM.

La phase d'acquisition consiste à obtenir des informations du véhicule suiveur via le bus CAN, des informations du véhicule suivi via la communication wifi et leurs positions GPS respectives grâce à des récepteurs GPS. Cette phase d'acquisition a été réalisée précédemment par l'équipe expérimentale du LIVIC. La phase de pré-traitement des données consiste à définir le contexte où se situe le véhicule suiveur. Dans le cadre de cette étude, ce contexte est défini par la vitesse du véhicule, le rapport actuellement utilisé par le conducteur, les informations de l'infrastructure sur l'horizon électronique prédéfini et la réaction que doit avoir le véhicule suiveur pour assurer

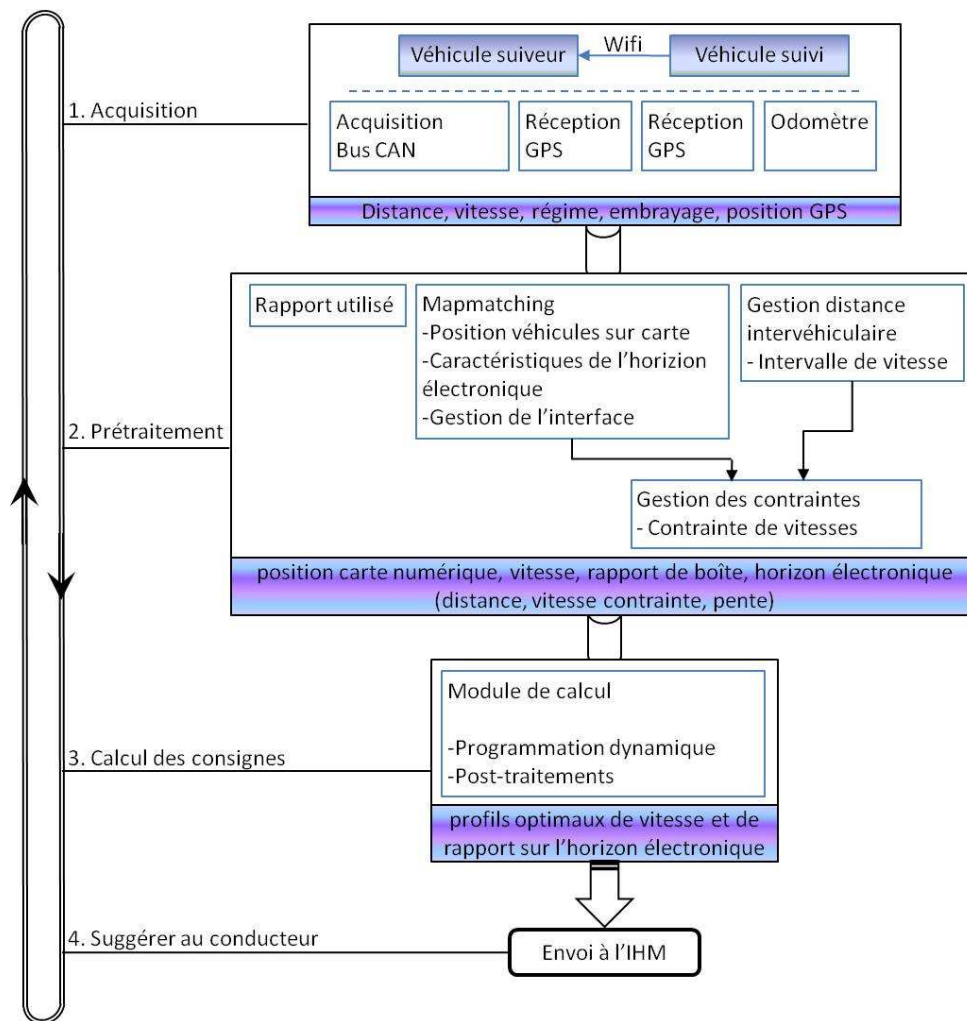


FIG. 5.14: Étapes de traitement du système EDAS

sa sécurité en terme de distance de sécurité dite de deux secondes. Pour cela, les informations de l'étape précédente sont traitées grâce à quatre composants présentés sur la figure 5.14. Une fois ce contexte défini, on procède à la recherche de la trajectoire optimale par le module de calcul à l'étape suivante. Cette troisième étape est réalisée en deux phases. Tout d'abord, la programmation dynamique est utilisée pour résoudre le problème de contrôle optimal. Ensuite, un processus de post-traitement est utilisé pour calculer les consignes à donner au conducteur. Il s'agit de transformer des consignes en distance en des consignes en temps. Finalement, les consignes calculées sont envoyées au conducteur via l'interface graphique.

La première étape d'acquisition avait été réalisée sous forme de composants réutilisables. Il est alors plus simple pour nous de développer le système sur cette même plate-forme utilisée au LIVIC, s'appelant RTMaps.

Logiciel RTMaps

Il s'agit d'une solution logicielle de la société Intempora (<http://www.intempora.com/>). Cette solution logicielle offre une plate-forme de développement et d'intégration des systèmes

embarqués. Son interface graphique permet une mise en place rapide des capteurs, actionneurs et algorithmes. L'environnement de développement permet quant à lui, de réaliser des différents types de composants. Cette solution a été choisie car elle nous a permis de nous concentrer uniquement sur le développement de nos algorithmes. Les composants liés à l'acquisition des données (GPS, Bus CAN, Communication Wifi,...), donc à la première étape, sont déjà disponibles au LIVIC. Cela nous a permis de gagner un temps très important. Le schéma d'implémentation de notre système sous RTMaps est alors présenté sur la figure 5.15.

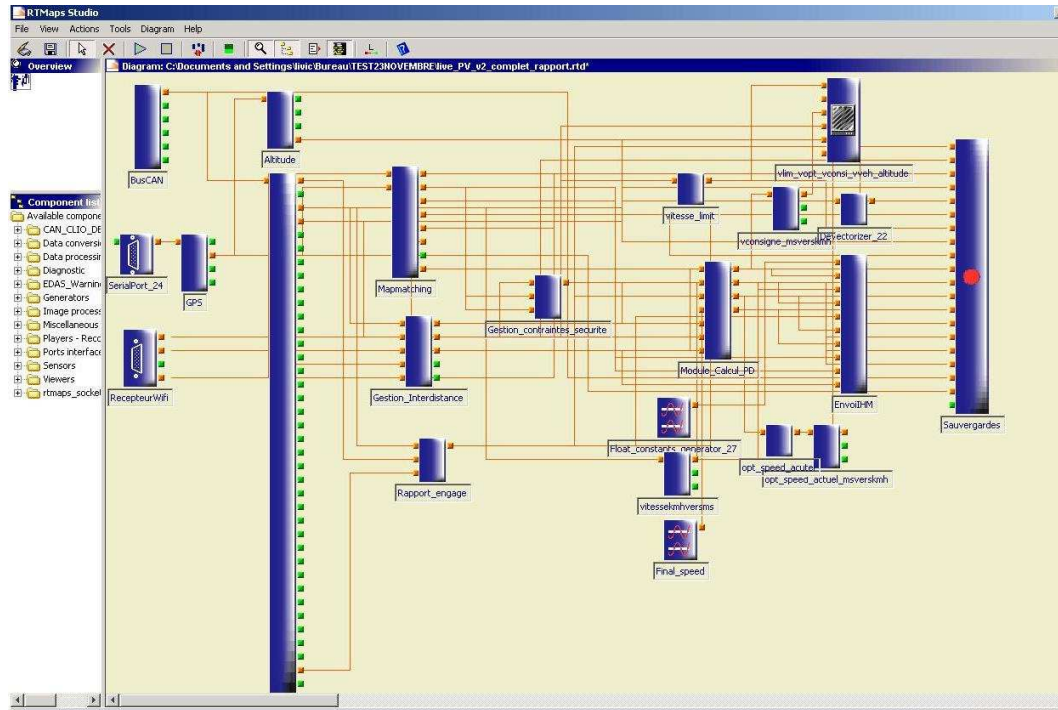


FIG. 5.15: Implantation du système sous RTMaps, sur le véhicule suiveur : interface graphique de RTMaps

Sur ce schéma, on distingue les quatre groupes de composants définis précédemment. Ce diagramme est celui utilisé pour l'ensemble des tests du système d'aide à la conduite écologique. La partie IHM est réalisée avec la librairie Qt et la communication entre le système et l'interface est assurée par le module "EnvoieIHM". Dans notre cas, il s'agit d'un partage d'information via le concept de la mémoire partagée.

Logiciel FISPRO

Pour implémenter notre contrôleur par logique floue, le logiciel FISPRO [GCL02] a été utilisé. Il s'agit d'une solution logicielle Open Source proposée par les chercheurs de l'INRIA. La mise en œuvre du contrôleur par logique floue sous RTMaps se focalise sur l'adaptation des codes sources du logiciel à notre application.

Le système est implanté sur l'ordinateur de bord du véhicule suiveur. L'ensemble des tests sur les circuits d'essais nous a permis d'ajuster les différents paramètres et d'avoir une première validation fonctionnelle du système. On présente maintenant les résultats obtenus lors des séries de tests du système avec la participation des différents conducteurs.

5.3 Campagnes d'évaluation du système

5.3.1 Objectifs

Le système étudié en particulier dans le cadre de cette thèse est un système suggestif. L'efficacité du système dépend de façon significative de la réaction du conducteur. L'objectif de ces séries de tests est alors d'évaluer le système avec différents conducteurs et de recueillir leurs premières impressions pour l'amélioration future des systèmes d'aide à la conduite écologique.

Deux niveaux de fonctionnement du système sont distingués. Le premier niveau concerne davantage son aspect écologique. Pour cela, les tests sont réalisés en circulation libre. Le second niveau ajoute les conditions de trafic via la distance de sécurité. Un deuxième véhicule est alors utilisé pour "simuler" cette condition de test plus proche de celle du roulage réel.

L'évaluation sera axée principalement sur les trois critères que sont l'environnement (gain potentiel de carburant), la mobilité (temps de trajet) et la sécurité (amélioration de la sécurité). Ensuite, on propose une première analyse des réactions des conducteurs après l'utilisation du système. En conclusion, on verra comment la sécurité peut influencer la réduction de la consommation ?

5.3.2 Organisation

Il ne s'agit pas de séries de tests conséquents d'un système abouti et prêt à être installé sur la flotte actuelle des véhicules mais plutôt d'une validation préliminaire d'un premier prototype de système visant la réduction de la consommation de carburant tout en améliorant la sécurité du conducteur.

Pour cela, la campagne est organisée avec la participation de 8 conducteurs volontaires, répartis sur deux phases de test. Dans un premier temps, deux conducteurs sont mobilisés pour conduire le véhicule prototype sur les pistes dans un scénario de libre circulation (pas de contrainte liée au trafic). Les six autres conducteurs sont mobilisés pour conduire ce même véhicule sur le même trajet mais avec un véhicule qui les précède.

Le fait de répartir les tests en deux scénarios reste dans la logique de notre développement. En effet, on souhaite d'abord valider le fonctionnement lié à l'économie de carburant. Ensuite, on valide le système complet avec les fonctionnalités liées aux différents problèmes de sécurité. Dans la première série de tests, seule la limitation à la vitesse légale est considérée comme contrainte de sécurité. Dans la deuxième série, le problème de sécurité est constitué, à nouveau, du point de vue de la limitation de vitesse mais aussi de la vitesse en approche de virage et de la distance inter-véhiculaire.

Un trajet de tests comprend deux passages sur le circuit "Routière-Val d'Or". Chaque conducteur doit réaliser deux trajets. Les deux premiers passages sont effectués sans le système d'aide. Il a été demandé aux conducteurs de faire des efforts pour réduire leur consommation de carburant. En d'autres termes, on leur demande de conduire avec leur style d'éco-conduite. Pendant les deux derniers passages, le conducteur conduit avec les consignes du système via l'IHM développée précédemment. L'objectif est de savoir si le système peut apporter des gains de carburant par rapport à l'utilisation de consignes simples d'éco-conduite. On remarque que la plupart des conducteurs ont déjà participé à l'expérience d'éco-conduite réalisée par le LIVIC. Ils ont donc des pré-requis de ce style de conduite et l'ont déjà pratiqué au moins une fois. Seul un conducteur n'a pas participé à l'expérience mais a assuré connaître cette pratique.

Les huit conducteurs peuvent être aussi divisés en deux catégories selon la connaissance du trajet. D'une côté, nous avons des conducteurs qui connaissent très bien les pistes et qui ont déjà effectué à plusieurs reprises le trajet considéré. Il s'agit de nos ingénieurs et nos techniciens

de l'équipe d'expérimentation. Ce contexte ressemble à celui des automobilistes qui effectuent quotidiennement leur trajet domicile-travail et connaissent parfaitement le trajet. De l'autre côté, nous avons des conducteurs qui connaissent une partie du trajet sans forcément réaliser fréquemment des tours de piste. La figure 5.16 montre la répartition des conducteurs selon les catégories.

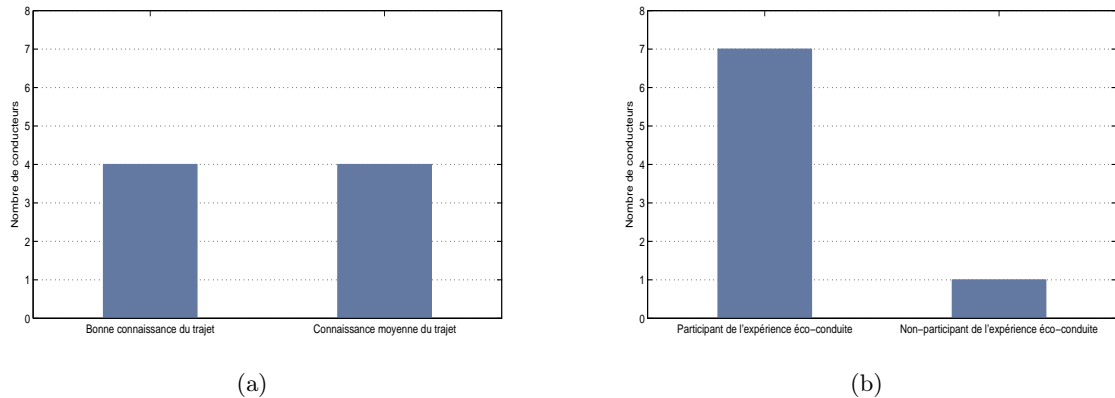


FIG. 5.16: Nombre de conducteurs par catégorie (a) : Nombre de conducteurs en fonction de la connaissance du trajet (b) : Nombre de conducteurs ayant participé à une autre expérience d'éco-conduite au LIVIC

Cette division nous fournit des informations supplémentaires pour l'analyse des résultats. En effet, la connaissance des pistes peut permettre au conducteur de mieux anticiper dans le cas de conduite sans consigne du système mais aussi de pouvoir se concentrer plus sur les consignes données par l'interface. Cela peut améliorer son économie de carburant. De même, la participation à l'expérience d'éco-conduite permet aux conducteurs d'acquérir des connaissances sur cette pratique. La comparaison est alors plus fiable.

Le dernier point sur l'organisation concerne la connaissance du système par les conducteurs. En effet, la plupart des conducteurs découvrent le système le jour de leur passage sur les circuits de tests. Aucun apprentissage préalable n'a été demandé aux conducteurs.

5.3.3 Déroulement des tests

Les deux séries des tests ont été réalisées le 11 octobre 2010 et le 23 novembre 2010. Comme les conducteurs connaissent assez bien les circuits d'essai, il nous semble que l'ordre des passages avec le système et sans le système d'aide n'est pas important. Il a été décidé que les conducteurs réaliseraient les deux premiers passages sans le système et termineraient leur participation à l'expérience avec une conduite guidée par le système. De même, les consignes d'éco-conduite ne sont pas rappelées au conducteur. On souhaite comparer l'efficacité du système avec leur conduite écologique qu'ils pourraient pratiquer quotidiennement.

Pour leurs premiers passages, il a été demandé aux conducteurs de faire des efforts pour réduire leur consommation tout en respectant la limitation de vitesse. Pour leurs deux derniers passages, il fallait qu'ils suivaient le plus fidèlement possible les consignes du système sans pour autant nuire à leur sécurité. L'interface du système a été présentée à chaque conducteur avant leur dernier passage. Les consignes données via l'interface leur sont à priori claires et compréhensibles.

En observant les réactions des conducteurs lors de ces essais, on ne remarque pas de difficulté particulière des conducteurs pour comprendre la signification des différentes consignes données. Sur la figure 5.17, on présente des exemples de consignes données aux conducteurs durant les tests.

Sur la figure 5.17e, quand le véhicule suiveur est trop près du véhicule suivi, le panneau d'alerte apparaît. En même temps, le système demande au conducteur de réduire sa vitesse. Ce qui semble alors cohérent, contrairement à la situation présentée sur la figure 5.6.

Pour le scénario lié à une circulation contrainte par un véhicule précédent, la procédure suivante est utilisée. Au départ, la distance entre deux véhicules est de 20 m. La seule consigne donnée au conducteur du véhicule suivi est de respecter la limitation de vitesse le long du trajet. Il a été précisé au conducteur du véhicule suiveur qu'il ne s'agissait pas de garder la même distance entre les véhicules mais de suivre le mieux possible les consignes lors de ses derniers passages et de pratiquer un style de conduite écologique pendant les premiers passages.

De façon générale, on remarque que les conducteurs ont respecté les consignes imposées. Les essais se sont bien déroulés dans l'ensemble sauf que les limitations techniques soulignées précédemment ont perturbé certains conducteurs. En effet, vers la fin du trajet, les erreurs cumulées par les odomètres provoquent une incohérence entre la distance inter-véhiculaire perçue par le système et celle perçue par les conducteurs. Grâce au marquage de la route, les conducteurs peuvent évaluer grossièrement leur distance avec le véhicule suivi. Quand la différence entre ces deux perceptions devient importante, les conducteurs sont perturbés, se sont posés des questions et perdent la concentration sur le suivi des consignes. Pour deux conducteurs, cette imprécision de mesure a provoqué le ralentissement du véhicule vers la fin du trajet de façon anormale. Pour éviter ce type de situation sur tous les autres conducteurs, on a demandé au conducteur du véhicule suivi de distancer le véhicule suiveur vers la fin du trajet. Dans ce cas, on revient donc à la situation d'une conduite en libre circulation vers la fin.

Cette limitation technique présente deux points à souligner. Les conducteurs peuvent s'interroger sur la fiabilité du système et donc avoir une mauvaise appréciation du système. Il est évident que ce point doit être corrigé avant des campagnes de tests plus conséquentes. Par contre, du point de vue du système, cette situation nous a permis de confirmer la cohérence des consignes données. Le système ne demande pas d'accélérer s'il voit que le véhicule précédent lui est trop près. À cause de ces erreurs de mesure, le trajet de test ne comporte plus que deux tours du circuit "Routière-Val d'Or".

Avec les problèmes techniques identifiés, un nombre limité de participants, les deux séries de tests ne visent pas à donner des confirmations définitives sur l'efficacité du système. Il est souhaitable de considérer les résultats qui suivent comme des premiers éléments de réponse aux questions liées au développement des systèmes d'aide à la conduite. La suite de ce chapitre présente ces éléments.

5.4 Résultats et analyses

Vu le nombre limité des données, il nous a semblé plus approprié d'utiliser une approche d'analyse descriptive pour montrer la différence entre une conduite écologique avec des consignes simples et une conduite écologique avec les suggestions de notre système.

Comme on l'a souligné, deux séries de tests ont été distinguées dans le but de valider deux différents niveaux de complexité du système.

La première série de tests n'implique qu'un seul véhicule qui est en circulation libre le long du trajet. Dans ce cas, il suit des profils de vitesse et rapport de boîte de référence. Ce niveau

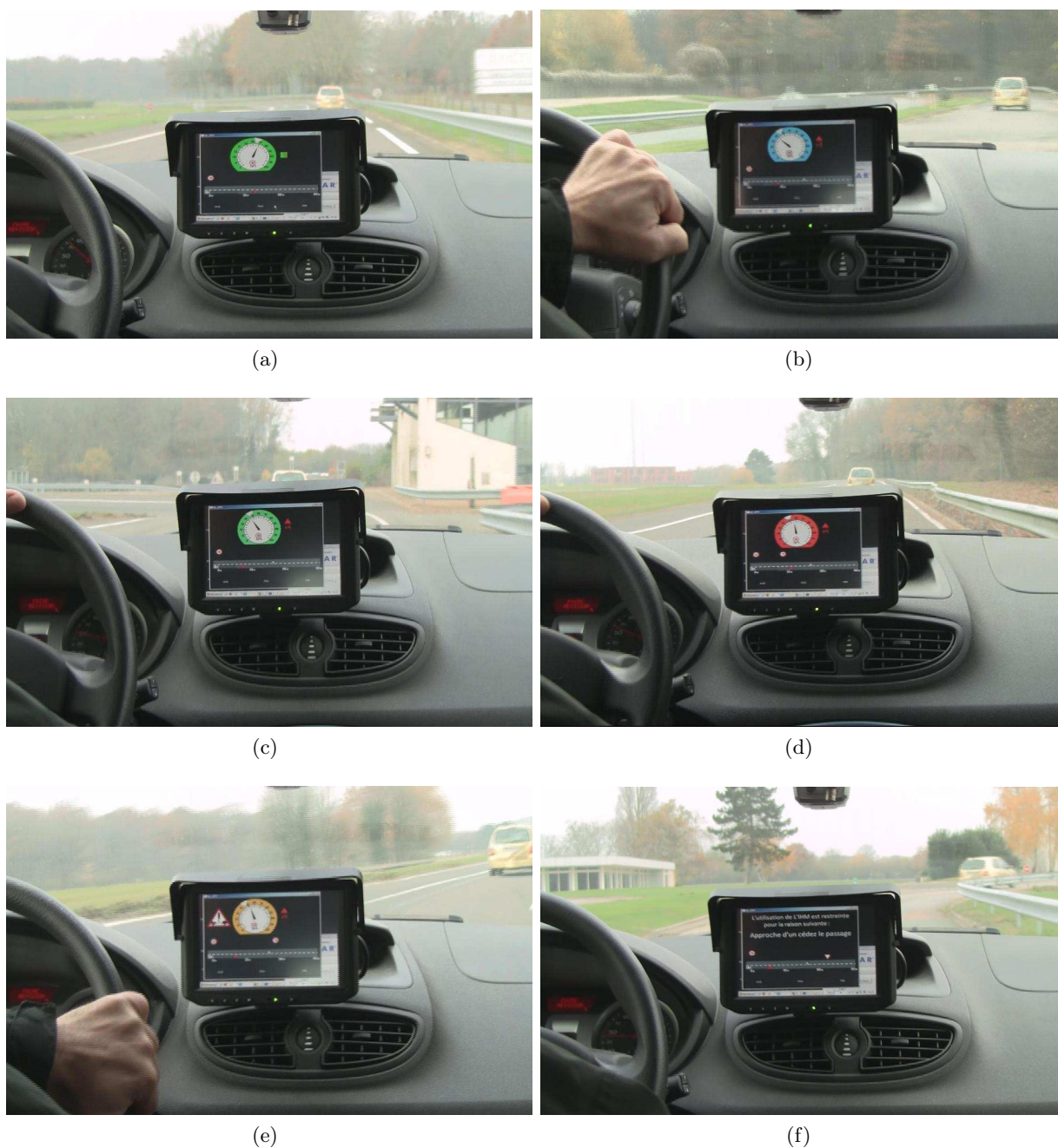


FIG. 5.17: Différents états de fonctionnement de l'IHM pendant le test (a) : La conduite est en adéquation avec les consignes (b) : La vitesse est en dessous de la vitesse conseillée et passer au rapport supérieur est conseillé (c) : La vitesse en adéquate, le rapport supérieur est demandé (d) : La vitesse est trop élevée, le rapport supérieur est conseillé (e) : Le véhicule est trop proche du véhicule de devant (f) : Désactivation de l'interface à l'approche d'un événement.

de fonctionnement peut être considéré comme un système d'aide à la conduite écologique avec une architecture en parallèle dans une situation de roulage réelle. Le système conçu cherche les

consignes optimales en terme d'économie de carburant en fonction des paramètres du véhicule, de la pente de la route et de la limitation de vitesse. Le conducteur joue à la fois le rôle du système de sécurité et du système de décision. En considérant l'environnement aux alentours, il décide lui même de suivre ou de rejeter les consignes données.

La deuxième série de tests permet d'évaluer le concept d'un système d'aide à la conduite écologique et sécuritaire que l'on souhaite mettre en place. En plus de la limitation de vitesse, la vitesse maximale en virage est prise en compte. Un deuxième véhicule intervient pour "simuler" une situation de conduite en trafic. Cette situation peut être considérée comme plus proche d'une condition de roulage plus réaliste sur un trajet inter-urbain. L'évaluation de ce niveau de fonctionnement du système nous permet d'avoir une idée plus précise du fonctionnement du système et de ses gains potentiels (économie de carburant et amélioration de la sécurité) pour un déploiement dans des conditions de circulation réelles.

Tout d'abord, il nous semble nécessaire de définir les indicateurs utilisés pour les analyses. Si la réduction de la consommation de carburant et la variation du temps de trajet peuvent être quantifiées, les aspects de sécurité ne le sont pas tout. Dans notre cas, seuls les dépassements des vitesses nous semblent évidents à être quantifiés. L'indicateur représentatif de ces dépassements est le pourcentage de temps en excès de vitesse légale le long du parcours. Un dépassement de vitesse est relevé si la vitesse du véhicule est supérieure de 3 km/h à la vitesse légale imposée. Le pourcentage de dépassement de vitesse est le pourcentage du temps en excès de vitesse par rapport au temps du trajet. Il peut être formulé par l'expression :

$$\%DepassementVitesse = \frac{\sum TempsEnExcesVitesse}{TempsTrajet} * 100. \quad (5.1)$$

La quantification des autres aspects concernant le respect de la vitesse maximale en virage, de la distance de sécurité est plus délicate.

On considère alors dans un premier temps les différentes variables quantifiables de chaque trajet, que sont : le temps de trajet en s , la distance parcourue en m , la consommation en ml , la consommation moyenne en $l/100km$ et le pourcentage de dépassements de vitesse.

La variation du temps de trajet et le gain en carburant entre deux trajets du même conducteur sont donnés en pourcentage. Ils sont calculés de la même façon que la consommation. Ainsi

$$Gain = \frac{ConsoSansIHM - ConsoAvecIHM}{ConsoSansIHM} * 100 \quad (5.2)$$

Examinons maintenant ces différents indicateurs sur les deux séries de tests présentées précédemment.

5.4.1 Scénario 1 : circulation libre

Le premier scénario est celui du véhicule en circulation libre. L'objectif de cette série de tests est de connaître le gain potentiel en consommation de carburant dans le cas où peu de contraintes sont imposées. On rappelle que chaque conducteur a réalisé deux trajets. Le trajet "sans IHM" signifie que le conducteur ne reçoit aucune consigne de la part du système. Il conduit de façon à réduire le plus sa consommation en carburant en pratiquant ses habitudes d'éco-conduite tout en respectant la limitation de vitesse. Le trajet "avec IHM" signifie que le conducteur essaie de suivre le mieux possible les consignes fournies par le système via l'interface présentée précédemment.

Consommation

L'objectif principal de ce système est de favoriser la réduction de la consommation réelle de carburant des conducteurs. Nous allons examiner s'il est atteint. Pour cela, deux indicateurs sont à l'étude : la quantité de carburant consommée en *ml* et la consommation moyenne en *l/100km*. En principe, comme les conducteurs effectuent le même trajet avec la même distance à parcourir, le gain (s'il y en a un) sera le même aussi bien qu'en terme de quantité de carburant consommée qu'en terme de consommation moyenne. Mais en réalité, il existe certaines imprécisions sur la distance parcourue entre les conducteurs et entre les trajets d'un même conducteur. En effet, tous les conducteurs ne se sont pas arrêtés exactement au même point d'arrivée au centimètre près. De plus, il suffit que les conducteurs abordent de façon différente un virage pour que les distances parcourues sur ce même trajet ne soient plus les mêmes. Par conséquent, on n'obtient pas tout à fait le même gain pour ces deux quantités. On préfère alors les présenter toutes les deux.

Sur le tableau 5.1, on présente les différents paramètres des quatre trajets réalisés par les deux premiers conducteurs dans le cas d'une libre circulation sur le circuit "Routière-Val d'Or".

TAB. 5.1: Résultats du scénario en circulation libre

Conducteur	Temps de trajet (s)	Distance parcourue (m)	Consommation cumulée (l)	Consommation moyenne (l/100km)
B sans IHM	651	10 624	0.6263	5.8944
B avec IHM	710 (+8.31%)	10 633	0.6151 (-1.79%)	5.7851 (-1.85%)
M sans IHM	630	10 667	0.7160	6.724
M avec IHM	691 (+8.83%)	10 674	0.6465 (-9.71%)	6.0566 (-9.93%)

Sur ce tableau, on note l'initial du prénom du conducteur, le type de trajet effectué (avec ou sans IHM), le temps de parcours, la consommation cumulée et la consommation moyenne aux 100 km.

Si on regarde la consommation cumulée et la consommation moyenne en *l/100km*, le gain d'économie de carburant du système est évident. Dans les deux cas, on obtient toujours un gain de carburant grâce au système. Il se situe aux alentours de 1.8% pour le premier conducteur et de 9% dans le cas du deuxième conducteur. On observe aussi une légère différence entre les gains en consommation cumulée et en consommation moyenne. Cela est dû à la différence de distances parcourues.

L'amplitude du gain obtenu est différente selon le conducteur. Le trajet de test ressemble davantage à un trajet mixte du cycle NEDC (figure 1.3). Dans ce contexte, la consommation conventionnelle d'un véhicule Clio Eco2 TCE 100 est de 5.5 *l/100km*. Cela signifie que plus la consommation du conducteur lors des premiers passages est proche de cette consommation conventionnelle, moins le gain d'économie de carburant est important. Ceci est le cas du premier conducteur. Si on peut obtenir le même gain avec des règles simples, l'utilisation d'un système d'aide à la conduite écologique n'est certainement pas justifiée pour le premier conducteur. Cependant, le gain obtenu par le deuxième conducteur reste significatif. Si on suppose que la conduite du premier conducteur est toujours très écologique, est ce que notre système devient totalement inintéressant pour ces automobilistes ? Examinons alors d'autres améliorations apportées par le système.

Dépassement de la vitesse

Comme nous l'avons remarqué, pour convaincre le premier conducteur d'utiliser le système proposé, l'argument de l'économie de carburant n'est pas suffisant. Le système doit apporter d'autres opportunités aux conducteurs. Dans le cadre de notre étude, cet apport est l'amélioration de sa sécurité.

Le tableau 5.2 présente les pourcentages des dépassements de vitesse des deux conducteurs de la première série de mesure.

TAB. 5.2: Scénario 1 : Pourcentage de temps en dépassement de la vitesse légale

Conducteur	Dépassement de vitesse légale (%)		
	sans IHM	avec IHM	Gain (%)
B	18.3	3.38	-79.23
M	21.3	7.11	-66.62

On voit que le pourcentage des dépassements de la vitesse diminue fortement avec l'utilisation du système. Les gains obtenus sont respectivement 79.23% et 66.62% pour les deux conducteurs. Ces gains montrent que le système apporte une amélioration certaine de la sécurité du conducteur en termes de diminution des excès de vitesse. Il faut souligner qu'en France, la vitesse reste toujours la première cause de mortalité sur les routes (un accident sur deux), devant l'alcool. Dans la moitié des cas, il s'agit d'une vitesse excessive (au-delà des limitations). Différentes études menées en France et à l'étranger confirment la nécessité de respecter ces limitations. L'adoption du "50 en ville" en est un exemple. Cette limitation a été imposée en France en 1990. Les deux années suivantes, on observe une baisse de 14.2% des accidents corporels et de 15.4% des accidents mortels (source : <http://www.securite-routiere.gouv.fr>). Ces différentes remarques montrent la nécessité de prendre en compte les limitations de vitesse dans la conception même des consignes d'économie de carburant. Outre l'amélioration de la sécurité, le système pourrait permettre au conducteur de réduire le risque d'avoir des sanctions financières qui vont de 90€ à 375€ pour un excès de vitesse inférieur à 20 km/h dans les zones de limitation de vitesse inférieure ou égale à 50 km/h. Le système permet ici une économie financière.

Contrairement à l'économie de carburant qui est plus ou moins significative en fonction du conducteur, la diminution des excès de vitesse est très importante pour les deux conducteurs. Ce qui peut devenir alors un deuxième argument pour convaincre le premier conducteur, par exemple.

La différence significative des pourcentages des dépassements de la vitesse explique aussi en partie la différence du temps de trajet entre la conduite sans système et la conduite avec système que l'on va analyser par la suite.

Temps de trajet

En effet, sur le tableau 5.1, on remarque l'augmentation du temps de trajet avec l'utilisation du système. Cette augmentation est d'environ 8% pour les deux conducteurs. La question qui se pose est : cette différence est-elle acceptable? Un temps de trajet plus long correspond souvent à une vitesse moyenne moins élevée. Dans ce cas, le risque d'accident lié à la vitesse pourrait diminuer. Cependant, on peut se poser la question quant à la fluidité du trafic et l'économie en carburant globale du réseau tout entier. On peut imaginer qu'avec une circulation moins fluide, le risque de bouchon est plus élevé. La consommation devient alors beaucoup plus importante.

Ces questions sortent évidemment du cadre de notre travail. À l'échelle du véhicule, la réponse à la première question posée dépend forcément du conducteur et de son objectif de conduite.

On a souligné précédemment que cette différence est fortement liée aux dépassements de la vitesse. On propose alors d'étudier cette cause plus en détail avec les profils de vitesse des deux conducteurs.

Effets des comportements des conducteurs

Dans le cas d'une circulation libre, on obtient toujours les mêmes profils de vitesse et de rapport de boîte en fonction de la distance. Ces profils sont donc des profils de référence pour le véhicule donné sur le même trajet. Ils sont présentés sur la figure 5.18.

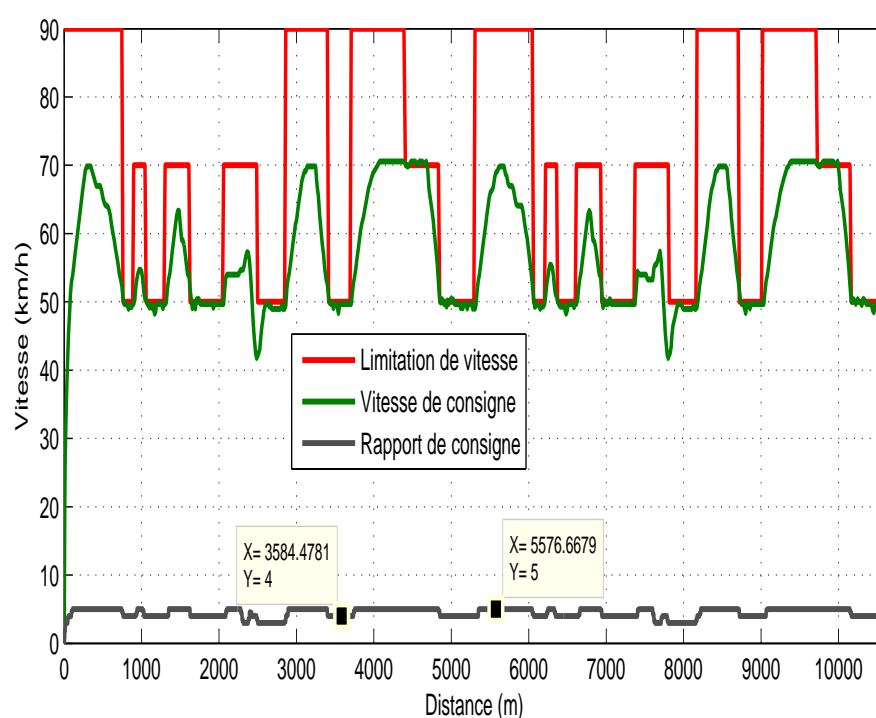


FIG. 5.18: Profils optimaux dans le cas de libre circulation

Dans la suite de ce mémoire, on s'intéresse plutôt à des consignes de vitesse que des consignes de rapport de boîte. En effet, la figure 5.18 montre que le système conseille le plus souvent les rapports supérieurs sauf dans le cas de la montée où le troisième rapport est demandé. Ce qui nous semble logique dans la mesure où le trajet est assez plat dans l'ensemble. Les rapports inférieurs qui fournissent plus de puissance et de couple dans les cas des montées ou descentes ne semblent pas nécessaires. La meilleure stratégie pour moins consommer sur ce type de trajet est d'utiliser des rapports élevés. C'est celle-ci qui est obtenue avec les calculs optimaux. Ensuite, les différentes études précédentes [BBS07] montrent que les rapports n'ont une influence significative sur la consommation qu'en ville avec des arrêts fréquents, ce qui n'est pas le cas de notre étude. Il nous semble alors préférable de plus nous concentrer sur les profils de vitesse.

Les profils de référence sont obtenus avec la technique de calcul en ligne développée dans le chapitre 4. On voit clairement que la vitesse optimale est très inférieure à la limitation de

vitesse. La raison provient du choix des valeurs de pondération des critères de la fonction coût. Le fait de maximiser le confort du passager, de favoriser l'utilisation du frein moteur pour réduire la consommation, revient donc à choisir un profil de vitesse le plus constant possible avec des décélérations réalisées uniquement avec le frein moteur. L'utilisation du frein moteur explique la raison pour laquelle on ne cherche pas à augmenter la vitesse jusqu'aux limitations supérieures à 50 km/h. Ce point va être précisé dans la suite de ce paragraphe.

Analysons à présent les différents comportements des conducteurs lors de ces tests. Ils sont présentés sur la figure 5.19.

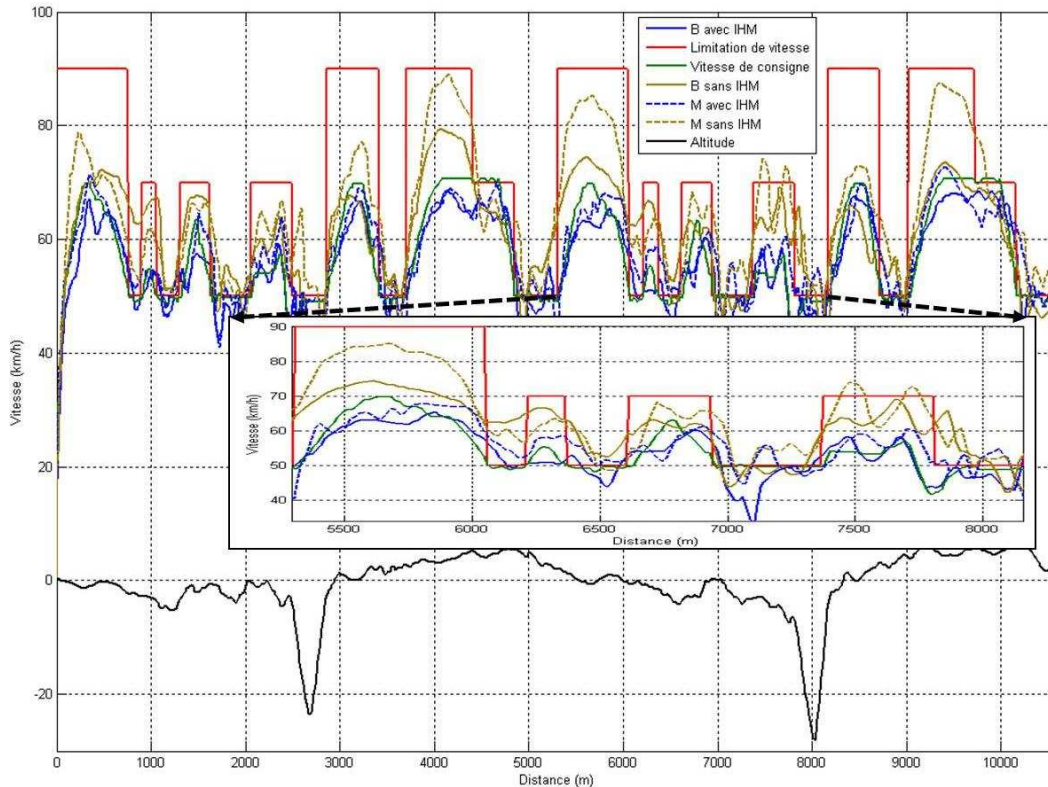


FIG. 5.19: Différents profils de vitesse des deux conducteurs

On s'aperçoit que le long du trajet, les conducteurs n'ont pas pu suivre exactement la consigne de vitesse donnée par le système. Par contre, la tendance générale est plus ou moins respectée. En effet, cela est tout à fait normal pour ce type de système. Il y a d'un côté le temps de réaction du conducteur et de l'autre côté, le fait qu'il ne puisse pas se concentrer tout le temps sur les consignes affichées sur l'IHM.

Les différences de vitesse les plus significatives entre les deux trajets se trouvent dans les zones de limitation de vitesse à 90 km/h. On se propose d'étudier cette différence en se focalisant sur la zone située entre 5500 m et 8000 m. Cet intervalle est constitué des zones de limitation de vitesses différentes. On a une zone de 90 km/h suivie par des changements entre les zones à 50 km/h et à 70 km/h. Le comportement habituel des conducteurs dans la zone à 90 km/h est d'approcher le plus près possible cette limitation de vitesse. Quand une zone de limitation de vitesse inférieure s'approche, ils essaient de diminuer leur vitesse en utilisant le frein moteur. Cela est en relation avec la quatrième consigne d'éco-conduite qui consiste à maximiser l'utilisation du frein moteur. Cependant, comme leurs vitesses sont élevées au moment où ils commencent à

laisser la voiture en prise, elles ne peuvent pas atteindre la vitesse limite au temps voulu. Cela fait que les conducteurs ne peuvent pas respecter les consignes de limitation à 50 km/h . Cette zone passée, les conducteurs voient arriver une zone de limitation de vitesse supérieure, ils reprennent alors les mêmes habitudes et rencontrent les mêmes problèmes de dépassement de vitesse. Cette infraction au code de la route est diminuée avec l'utilisation du système. En effet, pour éviter ce problème de dépassement de vitesse sur des zones de limitation inférieure, le système calcule alors une vitesse plus convenable pour une décélération par le frein moteur. Ce qui fait que la vitesse conseillée dans la zone à 90 km/h est très inférieure à cette limitation sur le trajet étudié.

Sur cet exemple, on voit la limite et la difficulté des pratiques de l'éco-conduite. En voulant suivre les consignes d'éco-conduite, les conducteurs se retrouvent en infraction du code de la route. On confirme qu'une conduite écologique ne correspond pas toujours obligatoirement à une conduite sécuritaire. Une des difficultés de la pratique d'éco-conduite se trouve dans la détermination du moment et de la bonne condition de déclenchement de l'utilisation du frein moteur. Cela est tout à fait normal car le conducteur ne dispose que d'un horizon de perception limité. Regardons à présent les comportements des conducteurs en cas d'utilisation du système d'aide. On voit que la vitesse pratiquée est moins élevée et les dépassements de vitesse sont moins importants. Pour comprendre les changements liés à l'utilisation du système d'aide, on propose d'analyser par exemple le cas du conducteur B.

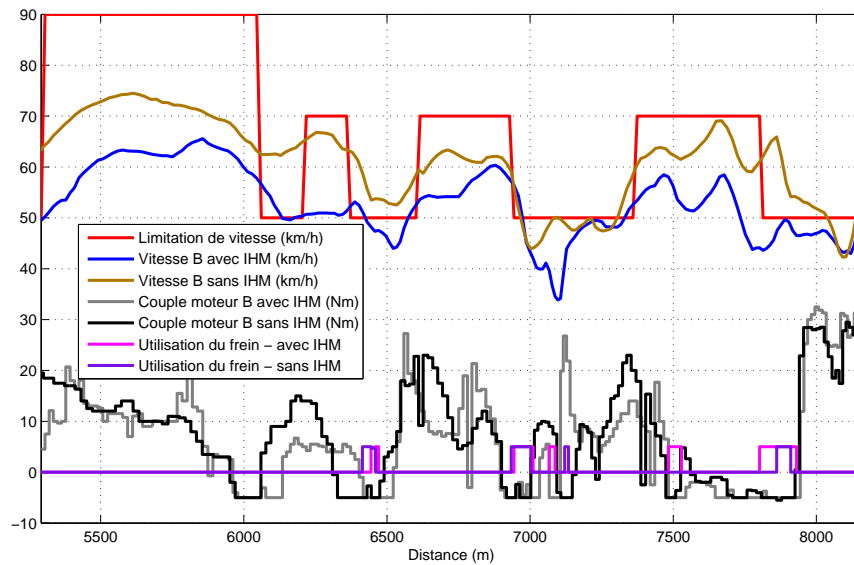


FIG. 5.20: Profils de vitesse et de couple moteur du conducteur B

Sur la figure 5.20, on présente les profils de vitesse et de couple moteur du conducteur B sur l'intervalle entre 5500 m et 8000 m. La valeur de couple négative correspond à une utilisation du frein moteur. L'utilisation du frein est aussi indiquée sur cette figure. Un niveau "0" correspond à l'absence du frein. Un niveau "1" (correspond à la valeur 5 sur la figure) indique l'utilisation de la pédale de frein.

On remarque sur cette figure que pour le premier changement de zone de limitation de vitesse, le conducteur commence le frein moteur au même moment dans les deux trajets. Cependant, comme les vitesses initiales ne sont pas les mêmes, les résultats de la stratégie utilisant le frein moteur sont très différents. Il est possible qu'en terme d'économie de carburant, on ob-

tienne le même gain. Mais ce qui n'est forcément pas le cas en terme de sécurité. Ce premier exemple montre que les consignes d'éco-conduite ne s'appliquent pas tout le temps. Pour pouvoir l'appliquer, il faut être dans les conditions qui le permettent. C'est ainsi l'intérêt d'un système d'assistance à la conduite écologique. En effet, comme le système ainsi conçu, a un champ de vision plus grand, les consignes données permettent au conducteur une meilleure anticipation et surtout d'avoir une approche plus globale qui consiste à préparer les conditions nécessaires pour pouvoir appliquer les consignes d'économie en carburant au bon moment. Si on calcule le pourcentage du temps en frein moteur, on n'observe pas un grand écart entre les deux trajets. Il est respectivement de 30% pendant les deux premiers passages et de 26% pendant les deux derniers passages dans le cas du conducteur B. Cela signifie que le frein moteur peut avoir une influence sur la consommation mais n'est pas forcément un élément dominant.

Dans ce premier scénario, on voit que le système peut apporter un gain de consommation et une amélioration de la sécurité. Dans cette analyse, on a souvent fait référence à des pratiques d'éco-conduite. L'objectif n'est pas de défavoriser cette pratique mais cela permet de mieux comprendre ses limites pour aider les conducteurs à en prendre conscience. On propose maintenant d'étudier le scénario le plus réaliste avec le cas d'un véhicule qui précède notre véhicule prototype.

5.4.2 Scénario 2 : circulation contrainte par un véhicule précédent

Ce scénario représente des situations de conduite plus proches des conditions de roulage réelles. Cela est réalisé par l'introduction d'un deuxième véhicule qui nous permet d'ajouter une nouvelle contrainte dynamique qu'est la distance intervéhiculaire. À chaque instant, trois situations concernant le problème de sécurité peuvent être envisagées. Si la DIV est très grande, on peut considérer qu'il s'agit d'une situation libre de circulation pour le véhicule suiveur. Si cette distance est proche de la distance à 2 secondes, le véhicule suiveur doit faire attention pour ne pas entrer dans une situation d'insécurité. Finalement, si les deux véhicules sont trop proches l'un de l'autre, le véhicule suiveur se trouve dans une situation d'insécurité en terme de distance imposée par la loi. En fonction de ces situations, les consignes données ne doivent pas être les mêmes. Le système d'aide à la conduite écologique conçu doit être capable de réagir correctement dans ces situations. C'est le cas du système proposé dont on souhaite démontrer cette capacité dans ce deuxième scénario.

Cette deuxième série de tests est réalisée avec la participation de six conducteurs. Chaque conducteur a parcouru quatre fois le circuit "Routière-Vald'Or" avec un véhicule qui le précède. Avec un véhicule suivi, on introduit plus de situations variées dans les études. Les trois situations décrites à-dessous sont représentées sur la figure 5.21.

On regarde par exemple différentes situations à la distance 2000 m. À cette distance, la vitesse du conducteur A est de 44 km/h et la distance avec le véhicule précédent est de 22 m. La distance de sécurité qu'il doit laisser devant lui est d'environ 29 m. Dans ce cas, le conducteur est dans une situation d'insécurité par rapport à notre définition. Pour le conducteur C, sa vitesse est de 43 km/h et la distance avec le véhicule précédent est de 29 m. La distance de sécurité devrait être 29 m. Dans ce cas, il est à la bonne distance avec le véhicule précédent. Mais la marge de sécurité est très faible. Le dernier exemple concerne le conducteur F. Dans ce cas, avec une vitesse de 43.7 km/h et une distance de 60 m, il est très distancé par le véhicule précédent. Cette figure montre que chaque conducteur est confronté à une situation de conduite différente. On n'obtiendra pas de consignes de référence comme pour le premier scénario. Les consignes données à chaque conducteur s'adaptent à sa situation réelle de conduite, ce qui est plus logique et plus proche de l'utilisation d'un tel système dans un trajet quotidien. C'est aussi ce qui différencie notre système de ceux qui existent actuellement.

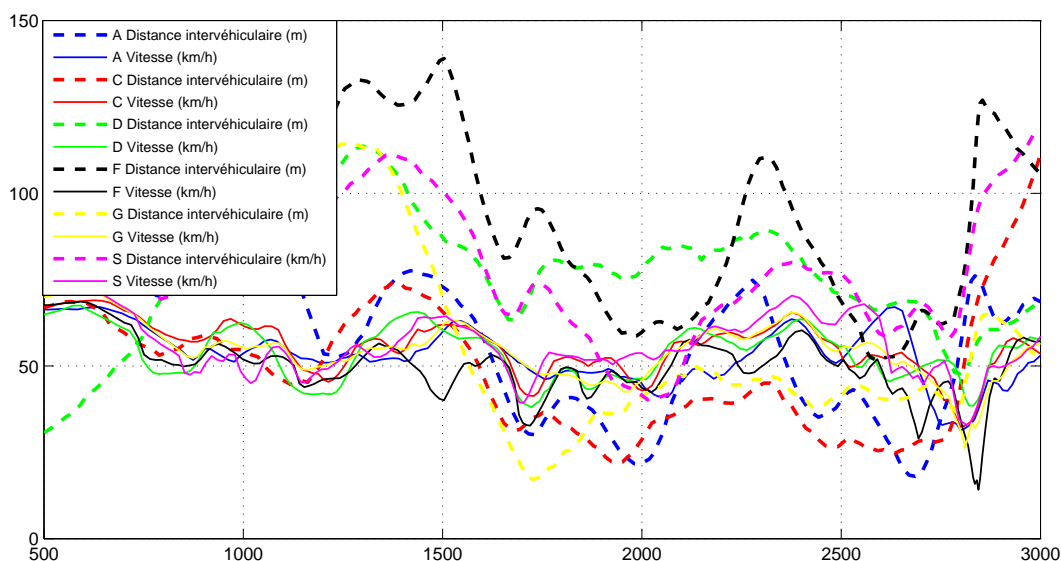


FIG. 5.21: Vitesses du véhicule suiveur de différents conducteurs (en trait solide) et distance inter-véhiculaire (en pointillés)

Regardons tout d'abord les différents gains apportés par le système dans ce deuxième scénario.

Consommation de carburant

Le tableau présente les résultats des six conducteurs participant à la deuxième série de tests. De la même façon que précédemment, on a dans le tableau 5.3 l'initiale des prénoms des conducteurs, le temps de trajet, la distance parcourue, la consommation cumulée et la consommation moyenne.

On constate que tous les conducteurs obtiennent une économie de carburant avec l'utilisation du système d'aide. Ce gain varie, comme dans le premier scénario, en fonction du conducteur. Il varie entre 1.3% à 9.1% en consommation moyenne et entre 1.6% et 12.9% en consommation cumulée. Ces gains commencent à être significatifs pour certains conducteurs. En plus, dans la conduite sans système d'aide, les conducteurs ont déjà fait des efforts pour consommer le moins possible. Si on suppose que ces efforts sont efficaces, le gain de réduction de consommation grâce au système pour chaque conducteur devrait être encore plus élevé par rapport à leur conduite normale.

La moyenne de la consommation moyenne de tous les conducteurs confondus sans IHM est de 6.61 l/100km. Elle est de 6.12 l/100km avec l'utilisation de l'IHM. Le système apporte alors un gain d'économie de carburant de 7.55% en moyenne. Encore une fois, le gain relatif à la consommation de carburant est à nouveau confirmé sur cette deuxième série de tests plus proche des conditions de roulage réelles.

Si on considère les conducteurs en fonction des catégories sur la figure 5.16, on ne voit pas encore très clairement l'influence de la connaissance du trajet sur la consommation de carburant. Cela contredit ce que l'on pensait au début. Ce point donc doit être revu durant les prochains essais.

TAB. 5.3: Résultats du scénario avec un véhicule devant

Conducteur	Temps de trajet (s)	Distance parcourue (m)	Consommation cumulée (l)	Consommation en(l/100km)
C sans IHM	678.92	10 693.7	0.6410	5.9946
C avec IHM	715.60 (+5.4%)	10 669.0	0.6307 (-1.6%)	5.9117 (-1.36%)
D sans IHM	683.13	10 708.5	0.7314	6.8297
D avec IHM	707.04 (+3.5%)	10 710.6	0.7007 (-4.19%)	6.5423 (-4.2%)
S sans IHM	662.24	10 666.8	0.7910	7.4152
S avec IHM	686.78 (+3.7%)	10 675.3	0.6914 (-12.6%)	6.4760 (-9.1%)
F sans IHM	712.97	10 688.8	0.7672	7.1770
F avec IHM	768.33 (+7.7%)	10 689.0	0.6706 (-12.59%)	6.2734 (-12.59%)
G sans IHM	642.43	10 679.2	0.6674	6.2490
G avec IHM	730.81 (+13.76%)	10 700.0	0.6186 (-7.3%)	5.7809 (-7.35%)
A sans IHM	684.78	10 693.4	0.6459	6.0404
A avec IHM	781.58 (+14.13%)	10 709.4	0.6182 (-4.2%)	5.77287 (-4.6%)

Dépassements de vitesse

Comme dans le premier scénario, le système permet de diminuer le pourcentage des dépassements de vitesse des conducteurs. Ce gain qui reste variable selon le conducteur est présenté dans le tableau 5.4.

TAB. 5.4: Pourcentage des dépassements de la vitesse légale

Conducteur	Dépassement de vitesse légale (%)		
	sans IHM	avec IHM	Gain
C	13.71	9.24	-32.6%
D	5.67	4.17	-26.4%
S	9.34	9.3	-0.42%
F	6.33	2.35	-62.8%
G	18.87	5.02	-73.39%
A	9.35	3.76	-59.78%

Les trois derniers conducteurs admettent des différences de pourcentage en dépassements de vitesse entre deux passages plus significatives que les autres. Par contre, cela ne correspond pas toujours à des dépassements plus fréquents de leur part. On prend l'exemple des conducteurs S et F. On a un écart de gain très important entre deux conducteurs. Celui qui améliore le plus sa sécurité avec le système (conducteur F) est aussi celui qui conduit plus prudemment pendant les deux premiers passages.

Encore une fois, on retrouve le lien entre la différence du pourcentage de dépassement de vitesse et la différence du temps de trajet entre deux passages.

Temps de trajet

Sur l'ensemble des deux scénarios, on remarque que la différence du pourcentage des dépassements de vitesse a une influence significative sur la variation du temps de trajet entre deux passages. La figure 5.22 représente ces deux paramètres.

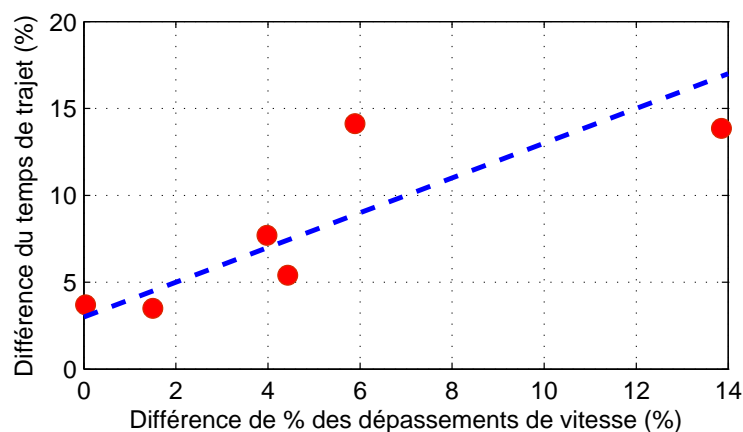


FIG. 5.22: Relation entre la différence du pourcentage des dépassements de la vitesse et la différence du temps de trajet

Il ne s'agit pas forcément d'une relation proportionnelle. Mais on remarque qu'une différence importante du pourcentage des dépassements de vitesse correspond bien à une augmentation du temps de trajet. On peut donc confirmer une des raisons de l'augmentation du temps de trajet en cas d'utilisation du système d'aide écologique.

Dans ce deuxième scénario, l'écart des temps de trajet peuvent venir de la variation de la situation de conduite. La vitesse du véhicule suiveur est forcément contrainte par la vitesse du véhicule suivi. Plus l'écart de vitesse du véhicule suivi entre deux passages est important, plus la différence sur le temps de trajet s'accroît. Dans le cas des deux derniers conducteurs, on voit que la distinction est très conséquente par rapport à l'ensemble des autres conducteurs. En effet, dans le cas de ces deux conducteurs, les erreurs de mesures présentées précédemment sont très significatives vers la fin du trajet. De ce fait, le système voit que le véhicule précédent est très proche du véhicule suiveur et oblige le conducteur à ralentir. Ce qui augmente le temps des premiers passages et donc agrandit l'écart entre deux trajets de ces conducteurs.

À partir de l'ensemble des analyses faites, on confirme l'efficacité du système d'aide à la conduite écologique en termes d'économie de carburant et de diminution des excès de vitesse dans le cas d'une circulation libre et dans le cas d'une conduite contrainte par un véhicule précédent. Ces gains varient en fonction des conducteurs. En moyenne, on obtient un gain en carburant aux alentours de 7.5% en comparaison avec le style d'éco-conduite pratiqué par les conducteurs. On peut tout à fait déduire que le gain peut être plus important si les conducteurs n'ont pas fait des efforts pour réduire leurs consommations sur le premier trajet. Cependant, on remarque que le temps de trajet augmente en cas d'utilisation du système, mais cette augmentation reste raisonnable pour la plupart des conducteurs. Surtout, on connaît la raison de cette augmentation. Dans ces premières analyses, on se concentre sur une étude quantitative des indicateurs représentatifs de la sécurité, du temps de trajet et de la consommation. On présente par la suite une étude qualitative sur les autres concepts du système testé.

En effet, le concept que l'on propose dans le cadre de cette thèse tient compte aussi du trafic

et du problème de vitesse maximale en approche de virage. Jusqu'à maintenant, ces deux aspects n'ont pas encore été analysés. Comme on l'a souligné, il ne s'agit pas de paramètres aisément quantifiables et statiques comme les autres informations. Une autre approche qualitative est alors nécessaire.

5.4.3 Scénario 2 : discussions sur la vitesse en virage et la distance inter-véhiculaire

Sur les deux scénarios présentés, le deuxième représente le cas où le système interagit avec les conditions de conduite. Dans cette section, on va se concentrer sur les deux paramètres : respect de la vitesse maximale en abord de virage et respect de la distance de sécurité entre véhicules.

Vitesse maximale en virage

Le problème de la vitesse à l'approche du virage est délicat à traiter. En effet, la vitesse maximale en virage dépend forcément du conducteur. La capacité à aborder un virage est modélisée par des accélérations latérale et longitudinale données. Elles varient entre 0.3 et 0.5 g et permettent de caractériser et de différencier un conducteur par rapport à un autre. Nous utiliserons, ici, le système d'alerte en vitesse en approche de virage (SAVV), développé au LIVIC [Gla04]. Ce système permet le calcul de la vitesse maximale en entrée de virage, en fonction des attributs de la route. Pour déterminer les coefficients adéquats associés à chaque conducteur, une démarche d'apprentissage a priori est forcément nécessaire. Cette démarche n'est pas encore implantée par les auteurs [Gla04] et dépassent le cadre de notre thèse. En plus, pour éviter le problème de sur-estimation de la vitesse maximale, il faut, aussi, bien connaître les caractéristiques de l'infrastructure notamment la courbure, la pente, le dévers et l'adhérence. Les trois premiers paramètres sont connus mais le quatrième n'est pas forcément très précis car il dépend de nombreux facteurs : contact pneumatiques/chaussée, état de la chaussée, météo... Pour nos tests sur piste, un profil moyen de vitesse maximale en virage est alors utilisé pour tous les conducteurs. Ce profil est présenté sur la figure 5.23.

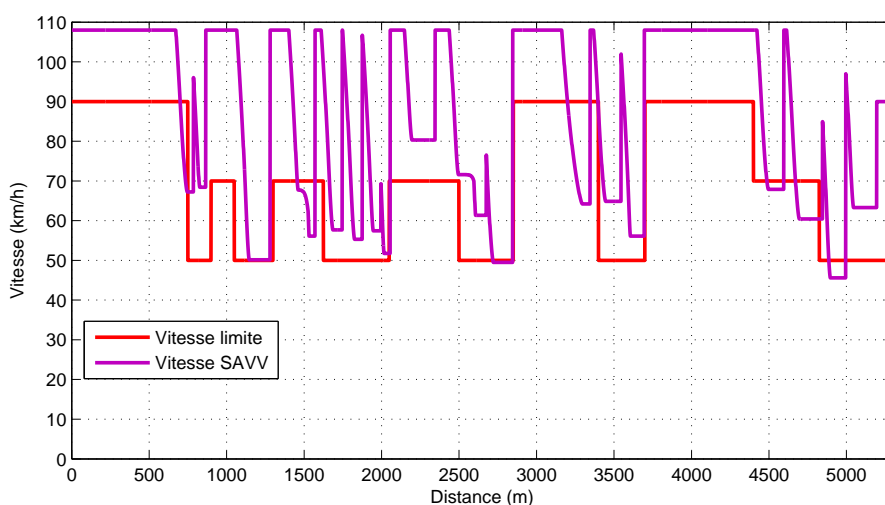


FIG. 5.23: Vitesse maximale en virage définie avec des accélérations latérales et longitudinales moyennes

On remarque d'abord que les vitesses maximales en virage sont la plupart du temps supérieures à la limitation de vitesse définie, exceptés les intervalles aux alentours de 1500 m et entre 4500 m et 5000 m. Pour étudier le problème de vitesse à l'approche du virage, nous avons retenu le deuxième intervalle. L'ensemble des vitesses des conducteurs sur ce deuxième intervalle est présenté sur la figure 5.24.

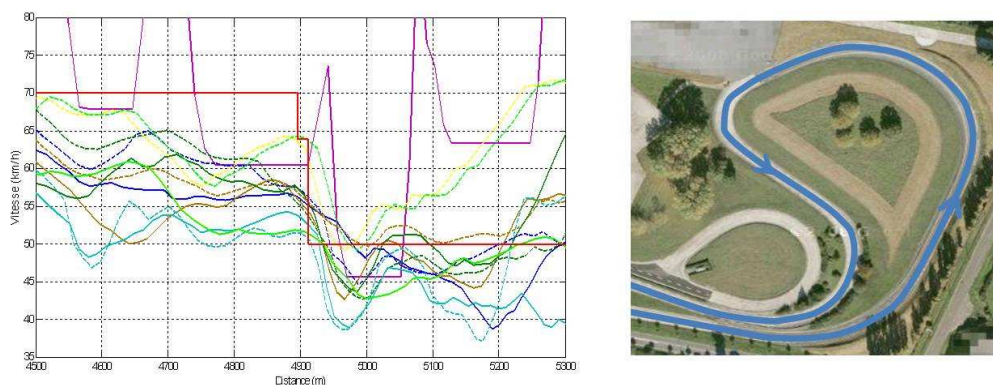


FIG. 5.24: Ensemble de profils de vitesse. Les vitesses d'un même conducteur sont de mêmes couleurs. En traits plein sont les vitesses enregistrées avec le système et en pointillés celles sans le système.

Il s'agit donc d'une succession de virages vers la fin du circuit "Routière". On remarque que la vitesse maximale en virage est mieux respectée dans la zone à vitesse élevée que dans la zone inférieure à 50 km/h. En général, la vitesse en virage sans le système SAVV est plus élevée que celle avec le système. Cela est dû en partie aux contraintes possibles du problème de la distance intervéhiculaire. Pour considérer seulement le problème de la vitesse en virage, on prend l'exemple du conducteur D. Les différents profils de vitesse de ce conducteur sont présentés sur la figure 5.25.

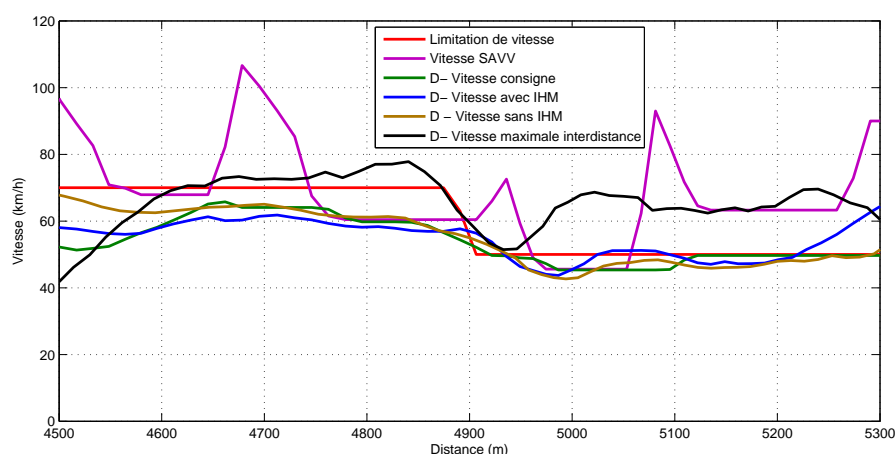


FIG. 5.25: Respect de la vitesse maximale en virage - cas du conducteur D

Sur celle-ci, on présente la vitesse légale, la vitesse maximale en virage donnée par le système SAVV, les vitesses du conducteur sur les deux passages, la vitesse de consigne donnée par le

système et la vitesse maximale inter-distance. La vitesse dite "maximale inter-distance" est la vitesse que le conducteur ne doit pas dépasser pour respecter la distance à deux secondes. Elle est déduite à partir de la distance inter-véhiculaire mesurée. Sur cette figure, on constate que cette vitesse est pour la plupart du temps supérieure à la vitesse légale et à la vitesse maximale en virage. Cela signifie que les consignes de vitesse ont été calculées avec très peu d'influence provenant du problème de sécurité inter-véhiculaire.

Sur cette figure, on remarque que la vitesse de consigne garantit le respect des vitesses limites. Le fait de la suivre permet de diminuer à priori les risques liés à l'excès de vitesse en virage.

Contrairement à la vitesse limite légale que tous les conducteurs doivent respecter pour ne pas être en infraction au code de la route, la même vitesse en virage peut représenter des niveaux de risque différents, dépendant du conducteur. Cette vitesse est présentée sur la figure 5.23. Le pourcentage des dépassements de cette vitesse n'est pas représentatif du risque qu'encourt un conducteur donné. C'est pour cette raison que l'on souhaite seulement montrer sa prise en compte dans les calculs de consignes optimales. La conclusion sur la diminution possible des risques en virage avec l'utilisation de notre système d'aide à l'éco-conduite serait plus évidente une fois que la vitesse limite en virage aura été mieux adaptée à l'habitude de conduite de chaque conducteur.

Respect de la distance de sécurité

Les résultats du cas d'un système actif simulé montrent que le système conçu est capable d'assurer la distance de sécurité à deux secondes tout en minimisant la consommation. Dans le cas d'un système informatif, notre objectif s'arrête à la prise en compte de ce critère pour être capable de donner des consignes cohérentes en fonction de la situation de conduite. On essaie donc d'éviter la situation où les consignes du système vont à l'encontre du problème de sécurité. Si on n'est pas dans une situation de sécurité, on conseille au conducteur de commencer à adapter sa vitesse avec cette situation. On guide le conducteur pour revenir vers une situation de sécurité au fur et à mesure et non pas pour lui permettre d'atteindre à tout prix une distance correcte dès la première alerte. Dans ce paragraphe, on souhaite rester sur une analyse du fonctionnement du système sans se prononcer sur les gains ou sur les améliorations de la sécurité par le système. On essaie de montrer la cohérence des consignes données.

Pour cela, on présente par la suite deux exemples de deux conducteurs différents. À travers ces exemples, on souhaite expliquer à nouveau le fonctionnement du système et son objectif. Commençons par le premier tour du conducteur S. L'ensemble des profils de vitesse liés à ce conducteur est présenté sur la figure 5.26.

La courbe en noir représente la vitesse maximale que le véhicule suiveur ne doit pas dépasser pour respecter la distance de deux secondes. La vitesse du véhicule précédent est aussi présentée. On remarque que le système ne permet pas de toujours éviter d'être dans une situation d'insécurité. Il existe de nombreux intervalles dans lesquels la vitesse de consigne est supérieure à la vitesse maximale déduite de la distance intervéhiculaire. Cela confirme bien que le système informatif n'assure pas de respecter scrupuleusement la distance à deux secondes. Ainsi, le respect de la distance intervéhiculaire dépend forcément du conducteur. La zone de désactivation de l'IHM est aussi présentée sur cette figure. Pour mieux cerner le problème, on se focalise sur l'intervalle [1600 m ; 2600 m]. Il est présenté sur la figure 5.27.

On ajoute sur cette figure le profil correspondant à la vitesse de consigne, additionnée de 3 km/h. Ce qui correspond à la tolérance pour que le conducteur reste dans la zone de conduite optimale. Sur l'intervalle [1800 m ; 2000 m], la vitesse du véhicule est supérieure à la vitesse de consigne et sort de l'enveloppe des trois km/h autour du profil optimal, ce qui accentue encore plus le non respect de la distance à deux secondes. Cependant, on remarque que le conducteur

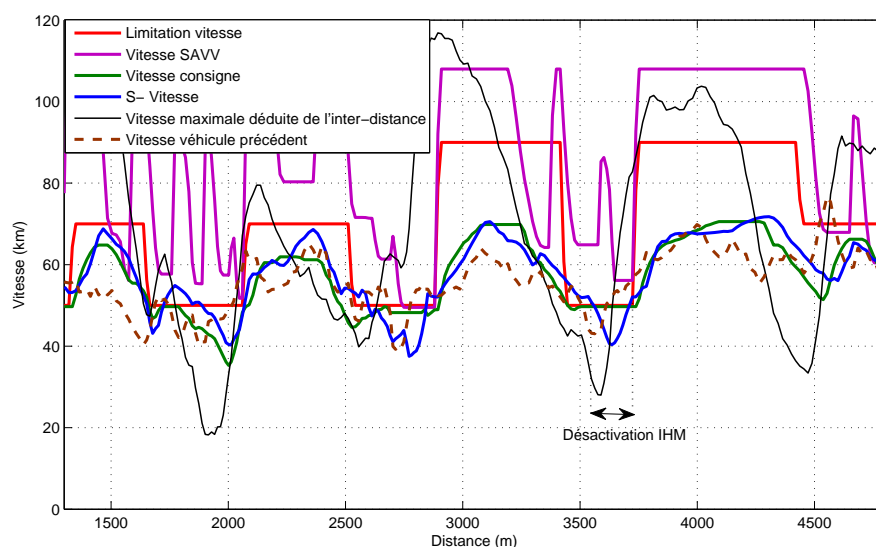


FIG. 5.26: Profils de vitesse sur le parcours du conducteur S

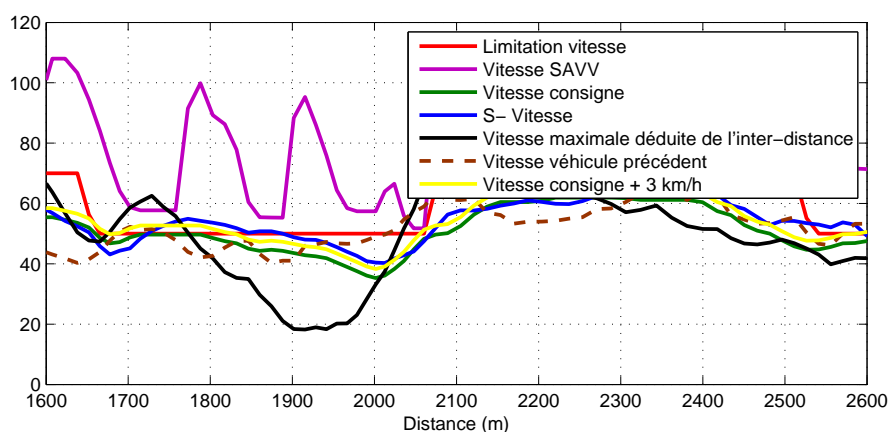


FIG. 5.27: Profils de vitesse du conducteur S

suit bien la tendance de la consigne de vitesse qui consiste à décélérer pour distancer le véhicule suivi. Le système ne fournit donc pas de consigne contradictoire à la situation de conduite. Ce qui ne serait pas le cas si on ne tenait pas compte du problème de sécurité lié à la distance inter-véhiculaire. La consigne "décélérer" est donnée jusqu'à ce que l'on retrouve la bonne distance à deux secondes. On remarque aussi qu'il s'agit donc d'une décélération progressive et non pas d'une forte variation de vitesse. À travers cet exemple, on montre que la prise en compte du trafic est nécessaire pour construire un système plus sûr. Même si la distance à deux secondes n'est toujours pas respectée, le système permet au conducteur de prendre conscience du risque qui se présente via des alertes apparues sur l'interface et diminue le risque de collision avec le véhicule précédent par des consignes qui vont dans le sens de l'amélioration de sa situation en terme de sécurité. L'objectif d'un système informatif est alors atteint. Pour terminer ce paragraphe, on présente sur la figure 5.28 un autre exemple correspondant au conducteur C.

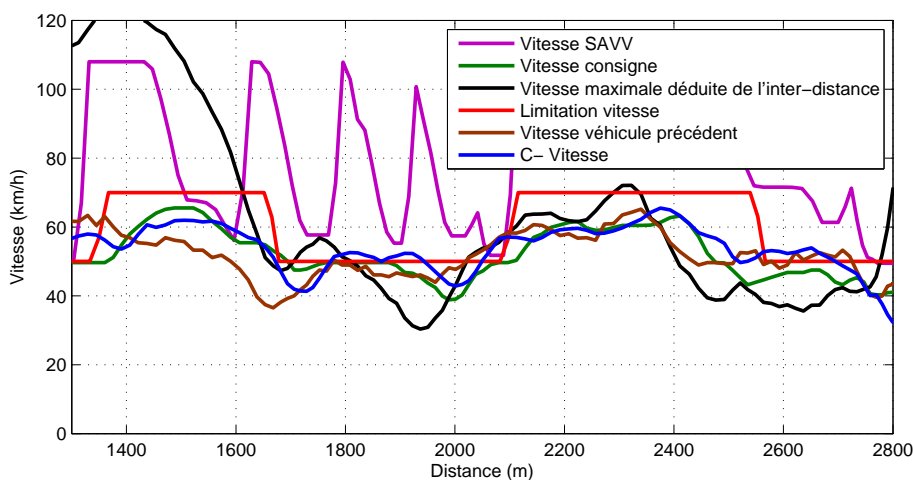


FIG. 5.28: Profils de vitesse du parcours du conducteur C

On retrouve les mêmes réponses du système pour des situations similaires. Ce qui prouve une certaine fiabilité et réactivité du système à des situations différentes.

5.4.4 Conclusion

Les analyses précédentes ont montré le gain potentiel d'économie en carburant et d'amélioration de la sécurité offerts par le système. On constate une réduction importante des dépassements de vitesse, des consignes plus cohérentes qui vont dans le sens de l'amélioration de la sécurité en terme de distance à deux secondes et une économie en carburant non négligeable pour certains conducteurs. On remarque qu'il existe toujours un compromis entre ces différents éléments.

On voit que dans le cas des limitations de vitesses inférieures ou égales à 50 km/h , la vitesse optimale est égale à ces limitations. Ce qui n'est pas le cas sur les zones de limitations plus élevées. La figure 5.29 peut nous apporter un élément de réponse. Cette figure est souvent reprise dans la littérature. Elle représente la consommation en carburant d'un véhicule en fonction d'une vitesse constante. Il s'agit d'une consommation moyenne sous forme exponentielle. Elle montre que la consommation minimale se situe sur l'intervalle de vitesse variant entre 60 km/h et 90 km/h . Dans le cas où les contraintes liées au trajet ne permettent pas d'atteindre cette zone, la consigne consiste à atteindre les valeurs limites pour s'approcher de la zone de vitesse optimale. Quand les conducteurs appliquent leur style de conduite écologique, ils ont tendance à augmenter la vitesse du véhicule jusqu'à cette zone. Mais cette vitesse n'est pas forcément adaptée au trajet étudié. Ce qui fait qu'en essayant de réduire la consommation, les conducteurs augmentent les risques d'excès de vitesse. Dans cette situation, le contexte de sécurité entrave l'économie de carburant.

Dans l'étude avec les simulations, on a montré que la bonne gestion de la vitesse en fonction de la pente était une source d'économie de carburant importante. Cependant, sur le trajet de test, cette influence ne peut pas être prouvée. Cela est dû au fait que le trajet est assez plan sur l'ensemble à l'exception d'une partie de forte pente sur la piste de Val d'Or. Ce qui ne nous permet pas de mettre en évidence tout l'intérêt d'un système d'aide écologique avec la prise en compte des caractéristiques de l'infrastructure. Sur la partie du trajet avec de fortes pentes, la recherche du profil économique est limitée par le problème de sécurité. On aurait pu imaginer

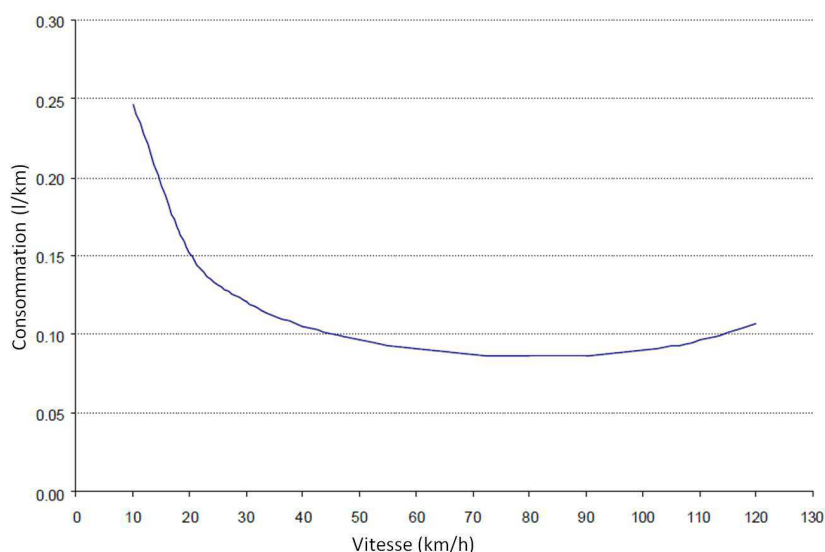


FIG. 5.29: Consommation moyenne en fonction de la vitesse de croisière d'un véhicule léger

que sur cette pente, on pouvait laisser le véhicule atteindre une vitesse plus élevée en descente pour aborder plus facilement la montée. Mais cela comporte des risques d'insécurité évidents. Dans ce type de situation, il vaut mieux privilégier l'aspect sécuritaire plutôt que l'économie de carburant.

Finalement, à travers les tests sur les pistes, il nous semble que l'économie de carburant ne provient pas forcément de la seule gestion efficace des montées et des descentes ou d'une stratégie de changement de rapport de boîte efficace. Elle provient plutôt d'une stratégie d'anticipation qui permet une meilleure gestion des accélérations et des décélérations. En effet, si les stratégies de sélection de rapport de boîte est plus efficace en ville [ADE09b], la gestion des montées et des descentes dans le cas d'un véhicule léger n'est efficace que si les pentes sur le trajet sont significatives (supérieures à 4% d'après les simulations). Cela montre que des tests sur le trajet "ARCOS" qui comporte ces deux caractéristiques sont alors très intéressants pour étudier de nouveau l'efficacité de notre système.

Qu'en est-il de l'acceptabilité des conducteurs ?

Il est difficile de tirer une conclusion objective, étant donné le nombre limité de participants et de tests et surtout quand des améliorations techniques doivent être encore réalisées. Cependant, certaines réactions positives et négatives sont intéressantes à noter.

Au niveau de l'interface Homme Machine, la plupart des conducteurs ont apprécié la clarté des informations données. Les conducteurs n'ont pas de difficultés particulières pour comprendre et appréhender cette interface. Cependant, la fréquence de rafraîchissement de l'affichage reste, pour certains conducteurs, un premier point à revoir. En effet, certains conducteurs trouvent que la période d'affichage de 1 seconde est un peu trop courte. Dans le cadre des tests sur piste, cette période reste encore acceptable mais dans le cas d'une conduite sur route ouverte, elle devient peut-être difficile à suivre.

En général, le suivi des consignes ne pose pas beaucoup de problème pour les conducteurs. Avec un système informatif, on n'attend pas du conducteur qu'il suive exactement les consignes données. On voit que la tendance est plus ou moins respectée. Pour certaines situations, le suivi

devient plus difficile si on demande au conducteur de changer le rapport et la vitesse en même temps. Cela est encore plus compliqué si on est dans un virage. Cependant, il est difficile de remédier à cela si on n'introduit pas d'autres critères représentatifs du comportement humain dans les stratégies de calcul.

Ces premiers tests montrent des signes encourageants concernant l'acceptabilité du système par les conducteurs. Des améliorations et d'autres tests sont nécessaires pour mieux répondre à cela. Il faut noter que les réactions des conducteurs ont eu lieu lors de leur premier contact avec le système. Il est fortement possible que ces réactions varient dans un sens comme dans un autre avec un plus grand temps d'utilisation, mais ces résultats préliminaires demeurent prometteurs.

Conclusion

Du fait d'une prise de conscience des conducteurs automobiles concernant le problème de réchauffement climatique, diverses alternatives sont proposées pour rendre leurs déplacements plus sympathiques à l'environnement.

Ce mémoire a passé en revue, dans un premier temps, les principales mesures pour tenter de diminuer la pollution atmosphérique due aux activités du domaine de transport routier et particulièrement du secteur automobile. Par la suite, on s'est intéressé plus particulièrement au développement des systèmes d'assistance au conducteur à la conduite écologique par son potentiel important d'économie en carburant. Les différentes solutions présentées sont assez complémentaires et pourront faire partie d'un système complet intégré dans un véhicule. Dans le cadre de cette thèse, on propose une nouvelle approche qui consiste à concevoir un système permettant à la fois de réduire la consommation, d'améliorer la sécurité et le confort du passager. Il s'agit d'une approche globale qui prend en considération les caractéristiques du véhicule, de l'infrastructure et du trafic. Le principe fondamental consiste à transformer le problème de réduction de consommation en carburant et d'amélioration du confort et de la sécurité en un problème d'optimisation sous contraintes. Pour atteindre cet objectif, différentes étapes ont été définies et réalisées.

Nous avons commencé par développer des modèles de la dynamique longitudinale et de la consommation en carburant du véhicule. Cette étape a été nécessaire pour prédire les mouvements du véhicule et évaluer la consommation qui leur est associée. Ces modèles relativement simples sont représentatifs des deux aspects du véhicule étudié. La cohérence du modèle longitudinal a été prouvée par comparaison entre les résultats simulés et les mesures réelles. Le modèle de consommation en carburant a été validé avec les données expérimentales des deux véhicules. Dans le cas du véhicule Renault Clio Eco2, l'erreur maximale reste élevée, aux alentours de 12%, mais l'erreur moyenne reste assez faible et le pourcentage des erreurs inférieures à 7% est de 99%. Ce modèle est alors tout à fait acceptable pour notre application.

La suite du travail a consisté à formuler le problème de minimisation de la consommation en carburant. Un problème de contrôle optimal hybride, non linéaire a été formulé. Une revue des méthodes d'optimisation a montré leurs inconvénients et avantages par rapport au cadre de notre application. Par comparaison avec la programmation Quadratique Successive dans le cas d'un exemple simple, la programmation dynamique a été choisie pour sa facilité de mise en œuvre, de tenir compte des différentes contraintes du problème et surtout pour l'optimalité globale des solutions obtenues.

Le problème initialement posé a été donc résolu avec la programmation dynamique sous forme d'un problème multi-objectif. On a introduit dans la fonction coût du problème, le temps de trajet, la consommation en carburant et le confort du passager. Leur interaction a été étudiée. Cette étude a montré qu'il existait des compromis à faire entre une conduite douce, écologique et le temps de trajet. On a pu aussi montrer que la façon d'aborder des pentes et des côtes a une influence certaine sur la consommation. L'utilisation d'un système d'aide peut s'avérer bénéfique

en économie de carburant.

Cette approche a permis donc d'obtenir des consignes qui seront les références pour un véhicule donné et sur un trajet donné. Elles sont utilisables en cas de libre circulation ou sur site propre. Il a été alors nécessaire d'avoir une solution plus adaptée à une situation de conduite normale en milieu urbain. Pour cela, une approche de calcul en ligne a été développée. La réduction du temps de calcul a été obtenue avec le changement de méthode de discrétisation (en distance), le regroupement des couples moteur et de freinage en une seule variable, l'utilisation d'un horizon électronique moins étendu et la réduction de l'espace de recherche en fonction de la situation où se situe le véhicule. L'ensemble de ces solutions a permis de réduire le temps de calcul de façon très conséquente et de rendre réalisable les calculs en ligne de consignes.

Pour adapter le système à une situation de conduite plus réaliste, l'introduction d'autres problèmes de sécurité a été nécessaire. La vitesse maximale en virage a été calculée par les méthodes développées par d'autres chercheurs du LIVIC et a été considérée comme une contrainte supplémentaire du problème d'optimisation. Le problème de la distance de sécurité a été traité par une approche basée sur la logique floue. La contrainte associée à ce problème a été recalculée à chaque période de calcul du système et définit par ailleurs, le contexte de sécurité en circulation du véhicule à chaque instant.

Les premiers résultats de simulations avec un système actif valident les concepts développés et ont montré le potentiel offert par le système, en termes de réduction de consommation en carburant et d'amélioration de la sécurité du passager. Des tests sur véhicule prototype d'un tel système auraient été intéressants mais n'ont pas pu être réalisés dans le temps imparti. Par la suite, une interface Homme -Machine spécifique a été développée pour tester le système en mode informatif ou suggestif. Le premier prototype opérationnel est installé sur le véhicule prototype du LIVIC. Les résultats de l'utilisation du système obtenus avec huit conducteurs sur les pistes d'essais sont encourageants. Par comparaison avec leur conduite écologique, une économie de carburant en moyenne de 7.5% a été obtenue avec l'utilisation du système. Ce gain varie entre 1.36% à 12.9% en fonction du conducteur et en fonction de la situation de conduite. De plus, des améliorations en terme de sécurité sont observées. Le système fournit des consignes plus cohérentes et adaptées à la condition du trafic. Cela permet de réduire le risque de collision avec le véhicule précédent. Les excès de vitesse ont aussi diminué avec l'utilisation du système. Cette diminution est de 50% en moyenne et peut atteindre jusqu'à 80% pour certains conducteurs. On a aussi relevé de nouveau le compromis entre la réduction de consommation et la sécurité. Le contexte de sécurité n'est pas toujours favorable pour une réduction de consommation de carburant.

Finalement, l'objectif de réaliser d'un système d'aide à la conduite écologique et sécuritaire est atteint. Une première étude a été réalisée avec les données issues des tests avec des différents conducteurs. Cependant, de nombreuses questions restent encore posées. Elles font l'objet des perspectives de cette thèse.

Perspectives

Dans le cadre de cette thèse, deux séries de tests d'évaluation ont été réalisées. Elles ont eu pour but de valider le fonctionnement du système et d'acquérir les réactions de différents conducteurs face un système informatif. Les résultats obtenus sont encourageants. Cependant, il reste encore des améliorations et des études à réaliser avant de confirmer l'efficacité d'un tel système.

Le premier point consiste à améliorer des mesures de la distance inter-véhiculaire. Même si le premier niveau de fonctionnement du système a été validé par des tests sur le circuit ARCOS, il

est préférable d'avoir des mesures de distance entre véhicules plus précises pour valider le concept présenté. Pour cela, la fusion des données issues du radar laser et des caméras pourra être une solution.

De même, il est évident que les deux séries de mesures ne sont pas encore suffisamment conséquentes pour avoir des analyses plus complètes et des confirmations sur l'efficacité du système. Des tests en conditions réelle sur le circuit ARCOS, dont une base de données d'éco-conduite est déjà disponible, sont donc très intéressants. Dans ce cas, il est alors souhaitable d'avoir les mêmes conducteurs ayant déjà participé à l'expérience précédente.

Le troisième point en perspective est notamment l'implémentation d'un système actif. En effet, l'inconvénient majeur du prototype actuel est qu'il peut focaliser la concentration du conducteur sur l'interface et non pas sur la circulation. Ce problème est commun pour tous les systèmes informatifs. Un affichage tête haute peut diminuer ce risque mais s'avère très coûteux. L'avantage d'un système actif est qu'on peut avoir des informations plus précises sur l'efficacité des consignes calculées avec la stratégie proposée sans être dépendants des conducteurs.

Finalement, il sera intéressant d'intégrer ce système sur d'autres types de véhicules notamment sur les poids lourds. À notre avis, un tel système peut apporter davantage de bénéfices sur un véhicule lourd qu'un véhicule léger. Ce transfert est en cours de réalisation avec la participation du LIVIC dans des projets sur ce thème.

Bibliographie

- [AB83] R. Akcelik and C. Bayley. Some results on fuel consumption models. appeared in progress in fuel consumption modelling for urban traffic managment. *Research Report ARR No. 124, Australian Road Research Board*, pages 51–56, 1983.
- [ADE09a] ADEME. Consommation conventionnelle de carburant et émissions de gaz carbonique des véhicules particuliers en france. Technical report, ADEME (Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie), 2009.
- [ADE09b] ADEME. Développement d’un système embarqué d’aide à l’écoconduite pour les véhicules du futur projet gerico (gestion de l’Énergie par interface conducteur). *L’ADEME et le PREDIT 3 (N° 6383)*, 2009.
- [Age] IEA (International Energy Agency). World energy outlook 2009, oecd/iea, paris.
- [Age09] IEA (International Energy Agency). How the energy sector can deliver on a climate agreement in copenhagen. *Special early excerpt of the Work Energy Outlook 2009 for the Bangkok for the UNFCCC meeting*, octobre 2009.
- [Age10] IEA (International Energy Agency). Co2 emissions from fuel combustion 2010 - highlights. *Edition 2010*, 2010.
- [Ahn98] K. Ahn. Microscopic fuel consumption and emission modeling. Master’s thesis, the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [Akc81] R. Akcelik. Fuel efficiency and other objectives in traffic system management. *Traffic Engineering Control*, 22 :54–65, 1981.
- [Akc89] R. Akcelik. Efficiency and drag in the power-based model of fuel consumption, transportation research. *Transportation Research*, 23B :376–385, 1989.
- [All96] J.M. Alliot. *Techniques d’optimisation stochastique appliquées aux problèmes du contrôle aérien, Thèse d’habilitation*. PhD thesis, Université de Toulouse Paul Sabatier, 1996.
- [AR93] F. An and M. Ross. Model of fuel economy with applications to driving cycles and traffic management. *Transportation Research Record 1516, Washington, D.C.*, 1993.
- [ARA⁺02] K. Ahn, H. Rakha, M. ASCE, A. Trani, and M. Van Aerde. Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128 :182–190, 3 2002.
- [aW02] A. E. af Wahlberg. Fuel efficient driving training - state of the art and quantification of effects. Technical report, Ecodriven.org, www.ecodriven.org, 2002.
- [BAB] D.P. Bowyer, R. Akcelik, and D.C. Biggs. Guide to fuel consumption analyses for urban traffic management. special report no. 32. australian road research board, nunawading.

- [Bak95] M. Baker. Fuel consumption and emission models for evaluating traffic control and route guidance strategies. Master's thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1995.
- [BB97] N. Barnier and P. Brisset. Optimisation par hybridation d'un csp avec un algorithme génétique. In *JFPLC'97*, 1997.
- [BB06] J. Barbé and G.A. Boy. On-board system design to optimise energy management. In *Proc. Int. Conf. European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, Valenciennes, France*, September 2006.
- [BB09] M. Barth and K. Boriboonsomsin. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D*, 14 :400–410, 2009.
- [BBD⁺09] B. Beusen, S. Broekx, T. Denys, C. Beckx and B. Degraeuwe, M. Gijssbers, K. Scheepers and L. Govaerts, R. Torfs, and L. Int Panis. Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 14, issue 7 :514–520, 2009.
- [BBS07] J. Barbé, G.A. Boy, and M. Sans. Gerico : A human centered eco-driving system. In *Proc. Int. Conf. 10th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Seoul, Korea*, September 2007.
- [Bäc95] T. Bäck. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*. 1995.
- [Bel57] R. Bellman. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.
- [Ben89] C.R. Bennett. The new zealand vehicle operating cost model. *RRU Bulletin 82, Transit New Zealand, Wellington*, 1989.
- [Ber01] M. Bergounioux. *Optimisation et contrôle des systèmes linéaires*. Dunod, 2001.
- [Bes81] C.J. Bester. *Fuel Consumption of Highway Traffic*. PhD thesis, University of Pretoria, 1981.
- [BI01] A. Bose and P. Ioannou. Analysis of traffic flow with mixed manual and intelligent cruise control vehicles : Theory and experiments. California path research report, University of Southern California, 2001.
- [Big87] D.C. Biggs. Estimating fuel consumption of light to heavy vehicles. *ARRB Internal Report AIR 454-1, Australian Road Research Board, Nunawading*, 1987.
- [Big88] D.C. Biggs. Arfcom - models for estimating light to heavy vehicle fuel consumption. research report arr 152, australian road research board, nunawading. Technical report, 1988.
- [BM79] M. Brackstone and M. McDonald. Car-following : a historical review. *Human Factors*, 21(4) :389–398, 1979.
- [Bor00] Pierre Borne. *Commande et optimisation des processus*. 2000.
- [Car05] O. Carsten. Prosper results : Benefits and costs. Technical report, Presentation at the PROSPER Seminar on 23 November 2005 in Brussels., 2005.
- [CCD10] V. Cerezo, F. Couche, and G. Dupré. Software alertinfa : a new tool for safety studies. *89th Transportation Research Board (TRB), Washington, USA*, January 2010.
- [CCF09] CCFA. L'industrie automobile française : Analyse et statistiques. Technical report, CCFA (Comité des Constructeurs Français d'Automobiles), 2009.

-
- [CCN⁺02] A. Cappiello, I. Chabiniand, E.K. Nam, A. Lue, and M. Abou Zeid. A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption. *Manuscript received March 15, 2002. This work was supported in part by Ford Motor Company through the Ford-MIT Alliance.*, 2002.
- [CEHW76] M.F. Chang, L. Evans, R. Herman, and P. Wasielewski. Gasolin consumption in urban traffic. *Transportation Research Record 599, Transportation Research Board*, pages 25–30, 1976.
- [CEHW79] M.F. Chang, L. Evans, R. Herman, and P. Wasielewski. Gasolin consumption in urban traffic. *Transportation Research Record 599, Washington D.C.*, 1979.
- [Cen94] P.D. Cenek. Rolling resistance characteristics of new zealand roads. *Transit New Zealand Research Report PR3-001, Wellington*, 1994.
- [Cer85] V. Cerny. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, no 45, 41-51, 1985.
- [CFA⁺06] C.Seren, F.Bommier, A.Bucharles, L.Verdier, and D.Alazard. Optimisation par algorithmes génétiques de protocoles expérimentaux pour la dynamique du vol. *Congrès du CIFA - IEEE, Bordeaux, France*, 2006.
- [CGH96] I. Charon, A. Germa, and O. Hudry. Méthodes d’optimisation combinatoire. In *Collection Pédagogique de Télécommunication*. Edition MASSON, 1996.
- [CH81] M.F. Chang and R. Herman. Trip time versus stop time and fuel consumption characteristics in cities. *Transportation Science*, 15(3) :183–209, 1981.
- [CH87] A.D. Chesher and R. Harrison. Vehicle operating costs : Evidence from developing countries. world bank publications, johns hopkins press. 1987.
- [Che99] R. Chelouah. *Adaptation aux problèmes à variables continues de plusieurs méta-heuristiques d’optimisation combinatoire : la méthode tabou, les algorithmes génétiques et les méthodes hybrides. Application en contrôle non destructif*. PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise, 1999.
- [CIE07] [http ://www.cieca.be/](http://www.cieca.be/) CIECA, editor. *Projet interne de la CIECA concernant l’intégration de l’éco-conduite dans la formation et l’examen des conducteurs de catégorie B*. 2007.
- [CM00] O. Carsten and M.Fowkes. External vehicle speed control,executive summary of project results. Technical report, Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2000.
- [Cul98] J.C. Culioli. *Introduction à l’optimisation*. 1998.
- [Del02] S. Delprat. *Evaluation des stratégies de commandes pour véhicules hybrides parallèles*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002.
- [DG97] M. Dorigo and L.M. Gambardella. Ant colony system : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 1997.
- [Din00] Y. Ding. Quantifying the impact of trafic-related and driver-related factors on vehicle fuel consumption and emissions. Master’s thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, May 2000.

- [dledS] SOeS (Service de l'Observation et des Statistiques). Consommation de carburants des voitures particulières en France 1988-2005. Technical report, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la Mer, <http://www.statistiques.equipement.gouv.fr>.
- [Duy09] Pierre Duysinx. Cours : Performances et comportement des véhicules. 2009.
- [EBL05] E.Trélat, B.Bonnard, and L.Faubourg. *Mécanique céleste et contrôle des véhicules spatiaux*. Springer, 2005.
- [EH78] L. Evans and R. Herman. Automobile fuel economy on fixed urban driving schedules. *Transportation Science*, 12(2) :137–152, 1978.
- [EHL76] L. Evans, R. Herman, and T. Lam. Multivariate analysis of traffic factors related to fuel consumption in urban driving. *Transportation Science*, 10(2) :205–215, 1976.
- [Ehr] J. Ehrlich. Towards isa deployment in Europe : State of the art, main obstacles and initiatives to go forward. *Road Safety Conference 2009*.
- [ELBF06] E. Ericsson, H. Larsson, and K. Brundell-Freij. Optimizing route choice for lowest fuel consumption. potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C*, 14 :369–383, 2006.
- [Ene] Energeco. <http://www.energeco.org/>.
- [ESLR06] J. Ehrlich, F. Saad, S. Lassarre, and S. Romon. Assessment of livia speed adaptation systems : experimental design and initial results on system use and speed behaviour. In *Proceedings of 13th ITS World Congress*, 2006.
- [Fle91] R. Fletcher. *Practical methods of optimization*. Wiley-Interscience, 1991.
- [GCL02] Serge Guillaume, Brigitte Charnomordic, and Jean-Luc Lablée. Fispro : An open source portable software for fuzzy inference systems, 2002.
- [Gil92] T.D. Gillespie. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers (SAE), 1992.
- [Gla04] S. Glaser. *Modélisation et Analyse d'un véhicule en trajectoires limites Application au développement de systèmes d'aide à la conduite*. PhD thesis, Université d'Evry-Val-D'Essonne, 2004.
- [Glo86] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, Vol. 13, no 5, 533-549, 1986.
- [GMS98] P.E. Gill, W. Murray, and M.A. Saunders. *User's Guide for NPSOL 5.0 : A Fortran Package for Nonlinear Programming*. Systems Optimization Laboratory, Stanford University, California, 1998.
- [GMS06] P.E. Gill, W. Murray, and M.A. Saunders. *User's Guide for SNOPT version 7.0 : Software for Large-Scale Nonlinear Programming*. Systems Optimization Laboratory, Stanford University, California, 2006.
- [Gol89] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 1989.
- [Gre03] I.D. Greenwood. *A New Approach To Estimate Congestion Impacts For Highway Evaluation - Effects On Fuel Consumption And Vehicle Emissions*. PhD thesis, The University of Auckland, 2003.

-
- [Gre10] Greenpeace. La voiture électrique sauvera-t-elle le climat ? potentiel et pièges éventuels de la mise sur le marché des voitures électriques. Technical report, <http://www.greenpeace.org>, 2010.
- [Han86] P. Hansen. The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming. *Communication at the Congress on Numerical Methods in Combinatorial Programming, Capri, Italy*, 1986.
- [Hel05] E. Hellstrom. Explicit use of road topography for model predictive cruise control in heavy trucks. Master’s thesis, Linköpings universitet, 2005.
- [Hel10] E. Hellstrom. *Look-ahead Control of Heavy Vehicles*. PhD thesis, Linköping University, Institute of Technology, Sweden, 2010.
- [Her02] R.G. Herrtwich. Digital roadmaps reveal the telematic horizon. *ITS America News*, 12(8) :15–17, 2002.
- [HFN05] E. Hellstrom, A. Froberg, and L. Nielsen. A real-time fuel-optimal cruise controller for heavy trucks using road topography information. *number 2006-01-0008 In : SAE World Congress. Detroit*, 2005.
- [Hol92] J. Holland. Genetic algorithms, scientific american, july, pp. 66-72. tr. fr. : Les algorithmes génétiques, pour la science, 179, 44-50. 1992.
- [Hoo83] J.N. Hooker. Optimal control of automobiles for fuel economy. *Transportation Science.*, 17, No. 2, 1983.
- [Hoo88] J.N. Hooker. Optimal driving for single-vehicle fuel economy. *Transpn. Res.-A*, 22A, No. 3 :183–201, 1988.
- [IEA08a] IEA. Key word energy statistics. Technical report, IEA (International Energy Agency), 2008.
- [IEA08b] IEA. Reviewu of international policies for vehicle fuel efficiency, iae information paper, in support of the g8 plan of action. Technical report, IEA (International Energy Agency), 2008.
- [JAV⁺99] R. Joumard, M. André, R. Vidon, P. Tassel, and C. Pruvost. Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières. Technical Report 9902, LTE, 1999.
- [JFE99] H. Johansson, J. Färnlund, and C. Engström. Impact of ecodriving on emissions and fuel consumption, a pre-study. Technical report, Swedish National Road Administration, 1999.
- [JK78] A.D. St John and D.R. Kobett. Grade effects on traffic flow stability and capacity. nhcrp report 185. *Transportation Research Board, Washington, D.C.*, 1978.
- [J.S04] J.Scordia. *Approche systématique de loptimisation du dimensionnement et l’élaboration de lois de gestion d’énergie de véhicule hybrides*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy1, 2004.
- [KGV83] S. Kirkpatrick, C.D. Gellat, and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science, Vol. 220, no 4598*, 671-680, 1983.
- [KN00] U. Kiencke and L. Nielsen. *Automotive Control Systems*. Springer, 2000.
- [Koz90] J. Koza. *Genetic Programming : A paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems*. PhD thesis, Stanford University, 1990.
- [Lam85] T.N. Lam. Estimating fuel consumption from engine size. *Journal of Transportation Engineering*, 111 :No.5, July 1985.

- [LBM⁺08] L.Nouveliere, M. Braci, L. Menhour, H. T. Luu, and S. Mammar. Infrastructure based fuel consumption optimization of a vehicle, 9th international symposium on advanced vehicle control avec08, japan, kobé. 2008.
- [LBML08] L.Nouveliere, M. Braci, L. Menhour, and H. T. Luu. Fuel consumption optimization for a city bus. *UKACC Control 2008, England, Manchester*, 2008.
- [LCG⁺08] O. Carstenand F. Lai, K. Chorlton, P. Goodman, D. Carslaw, and S. Hess. Speed limit adherence and its effect on road safety and climate change. Technical report, University of Leeds, 2008.
- [LHD⁺10] L.Nouvelière, H.T.Luu, F.R. Duval, B. Jacob, and S.Mammar. Eco-driving assistance system for low fuel consumption of a heavy vehicle : advisor system. *HVTT11 International Heavy Vehicle Symposium 2010, Melbourne, Australia*, 2010.
- [LhHPH10] Luo Li-hua, Liu Hong, Li Ping, and Wang Hui. Model predictive control for adaptive cruise control with multi-objectives : comfort, fuel-economy, safety and car-following. *Journal of Zhejiang University. Science A*, 11(3) :191–201, 2010.
- [LNM09] H. T. Luu, L. Nouveliere, and S. Mammar. Modélisation de la consommation en carburant d’un véhicule léger à partir de données expérimentales. *JD-JN-MACS, France*, 2009.
- [LNM10a] H. T. Luu, L. Nouveliere, and S. Mammar. Dynamic programming for fuel consumption optimization on light vehicle. *IFAC ACC 2010, Munich, Germany*, 2010.
- [LNM10b] H. T. Luu, L. Nouveliere, and S. Mammar. Ecological and safe driving assistance system : Design and strategy. *IEEE Intelligent Vehicles Symposiums 2010, San Diego, USA*, 2010.
- [LNM10c] H. T. Luu, L. Nouveliere, and S. Mammar. Toward a safer ecological driver assistant system. *17th ITS World Congres 2010, Busan, Korea*, 2010.
- [LNM10d] H. T. Luu, L. Nouveliere, and S. Mammar. Vehicle speed control for a safety-economical-ecological compromise : development of a driver assistance system. *10th International Symposium on Advanced Vehicle Control 2010, Loughborough, UK*, 2010.
- [Mat06] The Mathworks. *Optimization Toolbox User’s Guide, version*, matlab manual edition, 2006.
- [MG93] V.V Monastyrsky and I.M. Golownykh. Rapid computations of optimal control for vehicles. *Transportation Research*, 27B(3) :219–227, 1993.
- [Min01] Ministry of Transport. Field experiment intelligent speed adaptation. Technical report, ISA Tilburg. Final Report. Rotterdam, [In Dutch]., 2001.
- [ML05] J. Mar and H.T. Lin. A car-following collision prevention control device based on the cascaded fuzzy inference system. *Fuzzy sets and systems*, 150(3) :457–473, 2005.
- [MRR⁺53] N. Metropolis, A.W Rosenbluth, M.N Rosenbluth, A.H Teller, and E. Teller. Equation of state calculations by fast computing machines. *J. of Chem. Phys.*, Vol. 21, No. 6, pp. 1087-1092, 1953.
- [MS83] B.A. Murtagh and M.A. Saunders. *MINOS 5.5 User’s Guide*. Systems Optimization Laboratory, Stanford University, California, 1983.

-
- [NM07] L. Nouvelière and S. Mammar. Experimental vehicle longitudinal control using a second order sliding modes technique. *Control Engineering Practice*, 15(8) :9436–954, 2007.
- [Nou02] L. Nouvelière. *Commandes Robustes Appliquées au Contrôle Assisté d’un Véhicule à Basse Vitesse*. PhD thesis, Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, 2002.
- [NRC95] NRC. Expanding metropolitan highways : Implications for air quality and energy use. *National Academy Press, Washington, D.C.*, 1995.
- [OEE98] OEE. Driver behaviour affecting fuel consumption. Technical report, OEE (Office de l’Efficacité de l’Énergie), 1998.
- [P.03] Boucharel P. *Conception de loi de commande optimales pour l’amélioration de l’efficacité globale d’une chaîne de traction automobile*. PhD thesis, Institut National polytechnique de Toulouse, 2003.
- [Pic99] B. Piccoli. Necessary conditions for hybrid optimization. *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, Arizona USA*, 1 :410–415, 1999.
- [PKTC85] K. Post, J.H. Kent, J. Tomlin, and N. Carruthers. Fuel consumption and emission modeling by power demand and a comparison with other models. *Transport Research A*, 18A(No.3) :Pergamon Press Ltd, 1985.
- [Pon10] P. Ponticel. Focused on fuel economy. *SAE*, 2010.
- [PR05] F. Bonnans P. Rouchon. *Commande et optimisation de systèmes dynamiques*. 2005.
- [PTP⁺81] K. Post, J. Tomlin, D. Pitt, N. Carruthers, A. Maunder, J.H. Kent, and R.W. Bilger. Fuel economy and emissions research annual report. *Charles Kolling Research Laboratory Technical Note : ER36, University of Sydney*, 1981.
- [RA83] A.J Richardson and R. Akcelik. Fuel consumption and data needs for the design and evaluation of urban traffic systems. *Research Report ARR No. 124, Australian Road Research Board*, pages 51–56, 1983.
- [RAAT99] H. Rakha, M. Van Aerde, K. Ahn, and A.A. Trani. Requirements for evaluating the environmental impacts of intelligent transportation systems using speed and acceleration data. In *Presented at the Transport Research Board 78th Annual Meeting*, 1999.
- [Rec94] I. Rechenberg. Evolution strategy. In J. Zurada, R. Marks, and C. Robinson, editors, *Computational Intelligence - Imitating Life*, pages 147-159. *IEEE Press*, 1994., 1994.
- [Ree95] C.R. Reeves. Modern heuristic techniques for combinatorial problems. *Advanced Topics in Computer Science, Chapter 4, McGraw - Hill*, 1995.
- [Ros04] F. Rossi. Découvrez les algorithmes évolutionnaires. *GNU/Linux Magazine France*, (57) :42–51, Janvier 2004.
- [RSM⁺06] M. Rafael, M. Sanchez, V. Mucino, J. Cervantes, and A. Lozano. Impact of driving styles on exhaust emissions and fuel economy from a heavy-duty truck : laboratory tests. *Int.J. of Heavy Vehicle Systems*, 13(1-2), 2006.

- [RTY⁺06] M. A. Regan, T. J. Triggs, K. L. Young, N. Tomasevic, E. Mitsopoulos, E. Stephan, and C. Tingvall. On-road evaluation of intelligent speed adaptation, following distance warning and seatbelt reminder systems : Final results of the tac safecar project. Technical report, Monash University, 2006.
- [SC98] P. Siarry and R. Chelouah. Les métaheuristiques d’optimisation combinatoire : une démarche empirique, mais efficace, aussi pour l’optimisation globale. April 1998.
- [SDrT⁺05] J. Scordia, M. Desbois-renaudin, R. Trigui, B. Jeanneret, F. Badin, and C. Plasse. Global optimisation of energy management laws in hybrid vehicles using dynamic programming. *International journal of vehicle design*, 39 no4 :349–367, 2005.
- [SL77] A.B. Schwarzkop and R.B. Leipnik. Control of highway vehicles for minimum fuel consumption aver varying terrain. *Transpn. Res.*, 11 :279–186, 1977.
- [S.L06] S.Lee. Sequential quadratic programming based global path re-planner for a mobile manipulator. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2006.
- [SPA10a] G. Saint-Pierre and C. Andrieu. Caractérisation de l’éco-conduite et construction d’un indicateur dynamique pour véhicules thermiques. *Conférence sécurité routière Prévention des Risques et Aides à la Conduite PRAC 2010, Paris, France*, 2010.
- [SPA10b] G. Saint-Pierre and C. Andrieu. Caractérisation de l’éco-conduite et construction d’un indicateur dynamique pour véhicules thermiques. *Conférence sécurité routière Prévention des Risques et Aides à la Conduite PRAC 2010, Paris, France*, 2010.
- [SPE08] G. Saint-Pierre and J. Ehrlich. Impact of intelligent speed adaptation systems on fuel consumption and driver behaviour. In *Proceedings of 15th ITS World Congress*, 2008.
- [Sus99] H.J. Sussmann. A maximum principle for hybrid optimal control problems. *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, Arizona USA*, 1 :425–430, 1999.
- [Tec08] GreenRoad Technologies. Is safe driving more economical? driver safety and fuel consumption. Technical report, <http://www.greenroad.com/>, 2008.
- [Tré03] E. Trélat. *Contrôle optimal : théorie et applications*. Vuibert, 2003.
- [vdVDvM01] M. van der Voort, M.S. Dougherty, and M. van Maarseveen. A prototype fuel-efficiency support tool. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 9 :279–296, 2001.
- [VE03] A. Vahidi and A. Eskandarian. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control. *IEEE Transaction Intelligent Transportation Systems*, 4(3) :143–153, 2003.
- [Ver06] R.J. Vermeulen. The effects of a range of measures to reduce the tail pipe emissions and/or the fuel consumption of modern passenger cars on petrol and diesel. Technical report, TNO science and industry, 2006.
- [VMR80] R.A. Vincent, A.I. Mitchell, and D.I. Robertson. User guide to transyst version 8. transport and road research lab report no. lr888. 1980.

-
- [vMvdVvD02] M.F.A.M. van Maarseveen, M.C. van der Voort, and C.J.G. van Driel. Qualitative survey on fuel economy devices. *CE&M research report 2002R-005 / VVR-004 ISSN 1568-4652*, 2002.
- [WCR⁺84] C.E. Wallace, K.G. Courage, D.P. Reaves, G.W. Schoene, and G.W. Euler. *TRANSY-7F User's Manual*. US Dept. of Transportation, Office of Traffic Operations, 1984.
- [WEC08] WEC. Energy efficiency policies around the world : Review and evaluation. Technical report, WEC (World Energy Council), 2008.
- [WHP⁺87] T. Watanatada, C.G. Harral, W.D.O. Paterson, A.M. Dhareshwar, A. Bhandari, and K. Tsunokawa. The highway design and maintenance standards model, volume 1 - description, the world bank, john hopkins university press. 1987.
- [Wik] Wikipedia. New european driving cycle.
- [WMM80] H.C. Watson, E.E. Milkins, and G.A. Marshal. A simplified method for quantifying fuel consumption of vehicles in urban traffic. *SAE-Australia*, 40(1) :6–13, 1980.

Annexe A

Annexe

A.1 Paramètres des véhicules

Les véhicules utilisés pour les simulations et pour la phase d'expérimentation disposent des caractéristiques différentes. Cette annexe donne des valeurs numériques utilisées pour chaque véhicule.

Premièrement, on a le tableau A.1 des différents paramètres du véhicule. Certaines valeurs sont issues des **données du constructeurs**, d'autres sont des données mesurées ou approximées à partir

	Renault Laguna	Renault Clio Eco2	Unité	Signification
M	1100	1269	kg	Masse du véhicule
r	0.3062	0.297	m	Rayon du pneu
I_{et}	0.150	0.2630	$kg.m^2$	Inertie du moteur
I_d	0.115	0.115	$kg.m^2$	Inertie de transmission
I_w	0.760	2.8	$kg.m^2$	Inertie de roue
SC'_x	0.6138	0.725		Aérodynamique
ρ	1.205	1.205	kg/m^3	Masse volumique air
C_R	0.020	0.020		Resistance au roulement
N_f	3.867	4.092		rapport pont
N_t	1	3.73		rapport boîte
	2	2.048		
	3	1.3929		
	4	1.097		
	5	0.892		
η_{tf}	1	0.85		Rendement de transmission
	2	0.9		
	3	0.93		
	4	0.95		
	5	0.97		
T_{emax}	170 (à 3750)	145 (à 3000)	Nm	Couple max (à tr/min)
P_{max}	63 (à 3750)	74	Kw	Puissance max (à tr/min)

TAB. A.1: Valeurs numériques des paramètres du véhicule

Ensuite, on a les équation d'approximations des couples moteurs maximaux du véhicule Renault Laguna (équation A.1) et Renault Clio Eco 2 (équation A.2).

$$T_{eub} = \begin{cases} 120 & \text{si } 0 < \omega_e \leq 750 \\ 93.8018 + 0.0389 * \omega_e - 5.5246 * 10^{-6} * \omega_e^2 & \text{si } 750 < \omega_e \leq 6300 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$T_{eub} = \begin{cases} 0.0625\omega_e + 27.5 & \text{si } 0 < \omega_e \leq 1500 \\ 140 & \text{si } 1500 < \omega_e \leq 4500 \\ -0.0167\omega_e + 215.2 & \text{si } 4500 < \omega_e < 6300 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

A.2 Données du projet LAVIA

Ces données ont été enregistrées sur différents trajets avec plusieurs conducteurs. Elles comprennent que des données liées au véhicule comme la consommation, la vitesse, l'accélération, le couple moteur, le régime moteur, l'enfoncement du pédale avec un pas de 0.5 s. On ne dispose donc pas de donnée liée au trajet comme les coordonnées GPS et la pente de la route. Un exemple de trajet enregistré avec différents paramètres est donné sur la A.1.

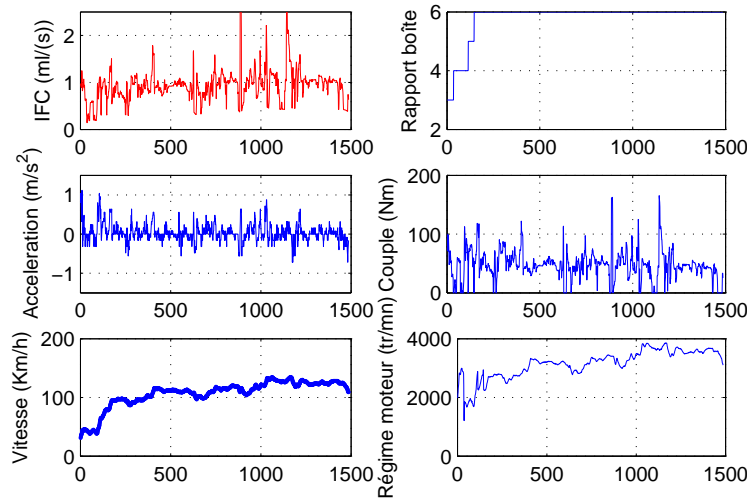


FIG. A.1: Exemple de trajet enregistré dans le cadre du projet LAVIA

Le tableau suivant présente les cinq paramètres qui nous intéressent dans la première phase de développement :

FC	la consommation instantanée de carburant	ml/s
ω_e	le régime moteur	tr/mn
T_e	le couple moteur	Nm
v	la vitesse	km/h
a	l'accélération	m/s^2

TAB. A.2: Les paramètres enregistrés

Le rapport de boîte utilisé n'est pas un paramètre enregistré mais qui peut être reconstruit à partir de la vitesse linéaire et le régime moteur. En effet, pour chaque rapport de boîte engagé, le rapport entre la vitesse du véhicule et le régime moteur est un constant. La figure A.2 illustre ce constat.

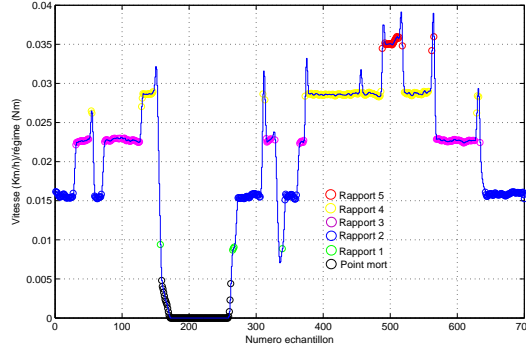


FIG. A.2: Détermination du rapport engagé à partir du rapport entre la vitesse longitudinale et le régime moteur

Au moment des transitions, le rapport entre la vitesse du véhicule et le régime moteur n'est plus constant. Il peut prendre des valeurs très différentes.

En utilisant la technique de classification par moyen médiane, on peut donc retrouver ce constant pour chaque rapport de boîte. Pour retrouver ensuite chaque rapport total de multiplication, les relations suivantes sont utilisées.

$$\left. \begin{aligned} v &= r\omega_w \\ \omega_e &= N_t N_f \omega_w \end{aligned} \right\} \Rightarrow N_f N_t = \frac{\omega_e}{\omega_w} = r \frac{\omega_e (\text{rad/s})}{v (\text{m/s})} = r \frac{3.6 * 60 \omega_e (\text{tr/min})}{2\pi v (\text{km/h})} \quad (\text{A.3})$$

Ces rapports sont présentés dans le tableau des valeurs numériques des paramètres du véhicule.

On peut donc ajouter au tableau A.2 le rapport de démultiplication.

Ensuite, deux étapes pré-traitements de ces données pour les tests et la modélisation ont été faites. La première consiste à choisir, parmi les trajets enregistrés, celui ou ceux qui représentent au mieux les différentes situations de circulation. Cela permet d'assurer que les modèles ne fonctionnent pas seulement dans des cas particuliers. La deuxième étape consiste à construire d'un côté des jeux de données pour la modélisation et de l'autre des jeux de données pour la validation. Sur un trajet choisi, on utilise par exemple sur 1000 mesures, les 300 premières pour faire la modélisation et le reste pour la validation.

A.3 Données du véhicule Renault Clio Eco2

A.3.1 Donnée du bus CAN

Le bus CAN est une application d'une approche très utilisée dans l'automobile qui consiste à échanger les informations entre de nombreuses sources sur le même fil. Cela permet de réduire de façon très conséquente la quantité de câbles dans les véhicules. Certaines données disponibles sur le bus CAN pour notre application sont données sur le tableau A.3.

D'autres informations sur l'état d'utilisation des équipements sont aussi fournies comme le pédale de frein (1 pour utilisé et 0 pour non utilisé), les feux de position, les feux de croisement,....

Nom de la Variable	Unité	Remarques
Temps	μs	2 colonnes
Régime moteur	tr/min	
Vitesse	$km.h$	2 colonnes
Distance parcourue	m	
Vitesse rotation roue avant droite	tr/min	
Vitesse rotation roue avant gauche	tr/min	
Vitesse rotation roue arrière droite	tr/min	
Vitesse rotation roue arrière gauche	tr/min	
Accélération longitudinale	m/s^2	
Accélération latérale	m/s^2	
Vitesse de lacet	deg/s	
Angle du volant	deg	
Vitesse angulaire du volant	deg/s	
Couple moteur	Nm	
Vitesse de lacet	deg/s^2	
Pédale d'accélérateur		16 relâchée 253 kickDown
Niveau carburant réservoir	l	
Consommation cumulée	en modulo	

TAB. A.3: Exemples des données acquises du bus CAN du Renault Clio Eco2

La consommation issue du bus CAN est donné en modulo et pour unité mm^3 . La première démarche consiste à reconstruire cette consommation. Sur la figure A.3, on présente la consommation cumulée issue du bus CAN et celle reconstruite.

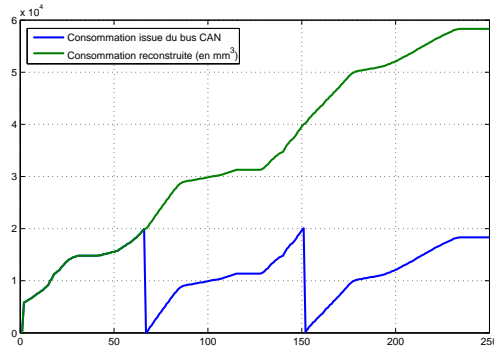


FIG. A.3: Reconstruction de la consommation cumulée issue du bus CAN

A.3.2 Consommation mesurée avec le débitmètre

On dispose dans le cadre de nos travaux de recherche un débitmètre de type DFL 1x-5bar de la société CORRSYS DATRON. L'intervalle de mesure de ce débitmètre est entre 0.5 et 150 l/h avec une précision de $\pm 0.5\%$. Il est adapté à la fois au véhicule léger et au poids lourd. Il est équipé aussi d'un circuit permettant de mesurer la quantité de carburant de retour au réservoir. Cela permet d'augmenter la précision du système. La figure A.4 montre l'installation

de cet équipement sur le véhicule Clio Eco2.

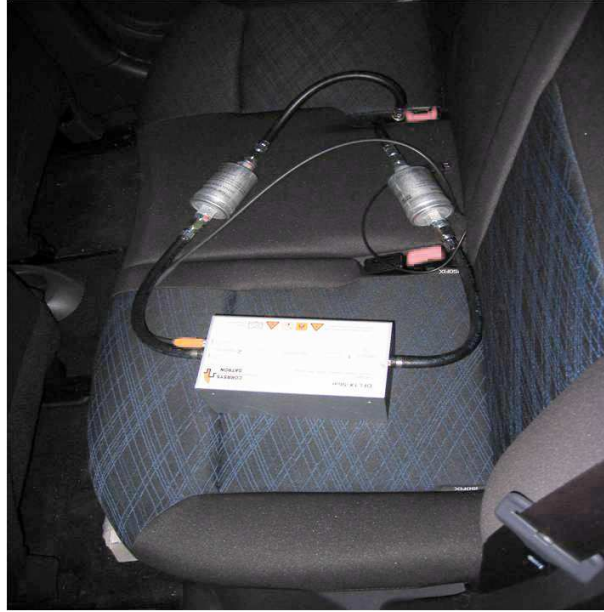


FIG. A.4: Installation du débitmètre dans le véhicule Renault Clio Eco2

Ce débitmètre fournit à la sortie la consommation cumulée en fonction du temps. Pour l'étalonnage du débitmètre, le réservoir du véhicule est rempli. On compare les résultats donnés par le débitmètre et le volume de carburant rempli. Cela nous a permis de vérifier grossièrement la précision de cet équipement. Cette manipulation a été réalisée à l'occasion d'un déplacement effectué entre Paris et Lille avec le Clio Eco2. On propose à présent comparer la consommation mesurée par le débitmètre et recueillie du bus CAN.

Sur la figure A.5, on présente la consommation cumulée issue du bus CAN et mesurée par le débitmètre.

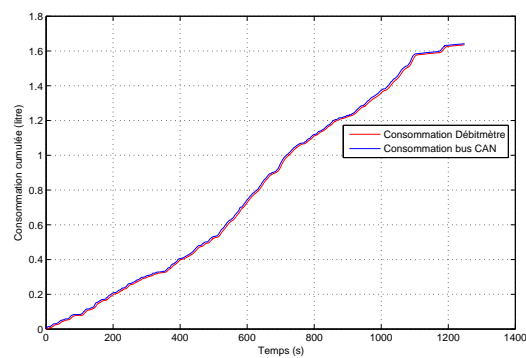


FIG. A.5: Consommation cumulée mesurée par le débitmètre et issue du bus CAN d'un trajet d'essai

On voit que la tendance des deux courbes se ressemblent fortement mais qu'il y a un décalage temporaire entre eux. Les mesures du débitmètre sont en retard par rapport aux mesures données par le bus CAN. Dans le cas d'une fréquence d'échantillonnage de 250 ms, ce retard est de l'ordre

de 6 secondes. La figure A.6 montre à nouveau les deux mesures du débitmètre et du bus CAN et les mesures du bus CAN décalé de 6 secondes.

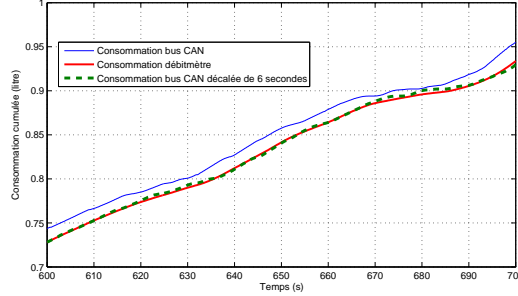


FIG. A.6: Consommation cumulée d'un trajet d'essai - problème de décalage temporaire entre les données du bus CAN et du débitmètre

Cet ordre de grandeur est retrouvé dans les différentes autres mesures. On voit que les mesures de la consommation de carburant se convergent entre le débitmètre et le bus CAN. Il est alors plus pratique d'utiliser la consommation donnée par le bus CAN par la suite pour éviter tout problème de synchronisation entre la mesure du débitmètre et des autres paramètres du bus CAN (vitesse, régime moteur,...). Par ailleurs, sur l'ensemble des études réalisées, le débitmètre est utilisé pour valider en quelque sorte les mesures de consommation données par le bus CAN.

A.4 Méthodes des moindres carrés

Si $\theta(t)$ représente le vecteur des mesures sur le système physique à différents instants $t = 0, \dots, T-1$, et $\hat{\theta}(\beta, t)$, les mesures prédites aux mêmes instants t par le modèle et dépendant donc du vecteur des N paramètres du modèle $\beta = (\beta_0, \dots, \beta_{N-1})^t$, alors les valeurs des paramètres sont celles qui minimisent :

$$Q(\beta) = \sum_{t=0}^{T-1} [\theta(t) - \hat{\theta}(\beta, t)]^2$$

Pour ajuster les paramètres du modèle, plusieurs stratégies sont possibles. Dans notre cas, on applique la minimisation du critère simultanément sur l'ensemble des données. On parle alors de "méthodes globales" de minimisation. Le modèle peut s'écrire simplement $\hat{\theta} = x * \beta$ avec $x = (x_0, \dots, x_{N-1})$ les variables du modèle. Le critère s'écrit alors :

$$Q(\beta) = \sum_{t=0}^{T-1} [\theta(t) - x(t) * \beta]^2$$

La solution du problème est donc $\beta = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \Theta$ avec X , une matrice (T, N) et Θ une matrice $(N \times 1)$.

A.5 Développement de l'IHM : évolution des versions

Cet annexe présente les différentes versions de l'IHM pour montrer les différentes réflexions sur la construction de l'IHM. Ces différentes versions sont réalisées dans le cadre du stage d'ingénieur de Vincent Hoarau, que j'ai suivi.

Sur la base d'une première version simple présentée sur la figure 5.3, on a voulu ajouté d'une nouvelle information pour que les conducteurs puissent mieux anticiper les changements de vitesses. Pour cela, une bande horizontale est construite pour représenter la route sur les 300 m à venir. Elle permet d'afficher le profil de vitesse optimale sur l'horizon électronique définie. Le même code de couleur est utilisé pour indiquer l'état futur de sa conduite si le conducteur reste sur la même vitesse actuelle. L'idée est de dire que si le conducteur voit une grande zone verte, cela signifie qu'il peut rester sur la vitesse actuelle dans les instants qui suivent. Si cette zone est bleue, le conducteur doit commencer à accélérer car il devra aussi le faire dans les instants futurs. Le même raisonnement est utilisé pour la rouge. L'interface correspond à cette version est présentée sur la figure A.7.

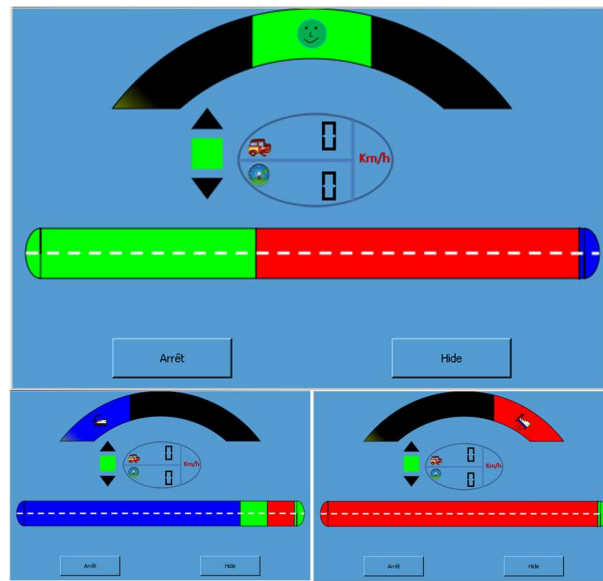


FIG. A.7: Version de l'IHM avec reconstruction d'un horizon de prédiction

Cette idée de consigne d'anticipation est abandonnée dans les tests finaux car elle est perturbante pour certains conducteurs. L'ajout de cette information rendre l'interface un peu trop chargée.

On a donc créé un module relativement simple permettant d'anticiper sur la vitesse optimale. Cependant cette seconde version souffre aussi de quelques défauts. Après un petit sondage réalisé au sein du LIVIC, il semblerait que l'affichage dans le module supérieur ne soit pas instinctif. Le fait que l'on éclaire alternativement la partie gauche puis droite ne serait pas au gout de la plupart des gens. De plus, il y a confusion entre la vitesse optimale et la vitesse du véhicule. Sans compter que la vitesse optimale n'est pas assez visuelle pour être suivie correctement. Une nouvelle interface est proposée sur la figure A.8

D'abord, on peut souligner le fait qu'il n'y a plus qu'une vitesse d'afficher : la vitesse optimale. En effet, pour éviter toute confusion, la vitesse réelle a été supprimée, car jugée superflue (l'information étant redondante puisque l'on l'a sur le compteur de vitesse). De plus, on remarque la disparition des 3 zones, remplacées par une unique, centrale, afin de capter le regard du conducteur dès le premier coup d'oeil. Elle présente l'avantage d'une simplicité et d'une prise en main facile. L'affichage de la route a également été modifié afin de le rendre plus compréhensible. Cependant, on reproche un manque de progressivité à cette version. Le conducteur ne peut pas, d'un simple coup d'oeil, savoir si il est encore loin de la vitesse optimale. Il doit

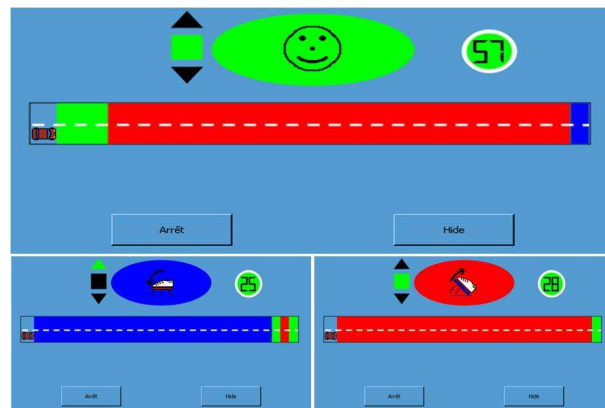


FIG. A.8: Évolution de l'IHM

pour cela regarder son compteur de vitesse et la comparer avec la vitesse optimale affichée. Afin d'éviter ce désagrément, une première solution a été de modifier la taille de l'ovale de couleur en fonction de la différence de vitesse. Celui-ci devenait de plus en plus gros lorsque cette dernière grandissait. Après sondage, l'idée a été abandonnée car l'utilisation n'était pas assez instinctive. Certaines personnes comprenaient que l'augmentation de la surface de l'ovale signifiait qu'on devait accélérer et non freiner. Nous en arrivons donc à la quatrième version de l'IHM.

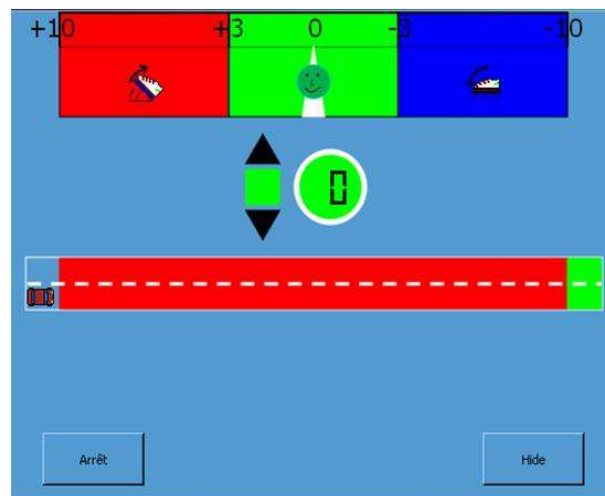


FIG. A.9: Version avec une répartition des zones

Cette quatrième version est dotée d'une aiguille mesurant la différence la vitesse du véhicule et la vitesse optimale, permettant ainsi au conducteur d'avoir la progressivité désirée. Visuelle et simple d'utilisation, elle a convaincu la plupart des sondés. Les autres lui reprochaient son côté enfantin, dû, sans doute, au panel de couleur utilisé. Les icônes renforcent cet immaturité. On conservera donc pour la version finale l'idée de l'aiguille mais on l'associera à des couleurs plus sobres. De plus, à l'unanimité, il faudra retirer l'affichage du module d'anticipation. Celui-ci est difficile à comprendre et finalement peu utile dans l'utilisation de l'interface.

Finalement, à plusieurs d'autres essais, on arrive à la version présentée sur la figure 5.6.

A.6 Compléments théoriques sur la commande par mode glissant

On détaillera ici la commande par modes glissants d'ordre 1.

A.6.1 Définitions

On définit $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_2 \end{pmatrix} \in \Omega$ où Ω représente un sous ensemble de \mathbb{R}^n et X est l'état du système. On étudie un système non linéaire défini par :

$$\dot{X} = f(X, t, u) \quad (\text{A.4})$$

Avec $u : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ l'entrée du système et f un champ de vecteurs suffisamment différentiable.

On définit aussi la fonction de glissement $s : \Omega^+ \mapsto \mathbb{R}$ suffisamment différentiable et telle que $\frac{\delta s}{\delta X}$ soit non nulle sur Ω .

Une surface de glissement est un sous ensemble de Ω de dimension $n-1$ définie par : $S = \{X \in \Omega : s(X, t) = 0\}$ Cette surface coupe l'espace en deux sous espace :

$$s^- = X \in \Omega : s(X, t) < 0 \text{ et } s^+ = X \in \Omega : s(X, t) > 0 \quad (\text{A.5})$$

Nous définissons deux champs de vecteurs f^+ et f^- tels que :

$$\begin{cases} \dot{X} = f^+(X, t, u) & \text{si } X \in s^+ \\ \dot{X} = f^-(X, t, u) & \text{si } X \in s^- \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

f^+ et f^- sont les champs de trajectoires du système. On dit que la surface de glissement S est attractive lorsque l'état X du système, qu'il appartienne à s^+ ou s^- est attiré par cette surface en suivant les équations A.6. Une fois que $X \in S$, on dit que l'état glisse sur la surface. Il existe alors un mode de glissement.

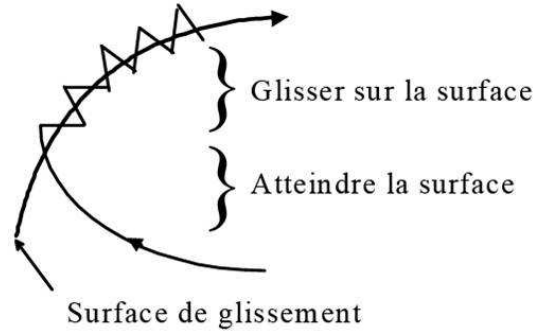


FIG. A.10: Illustration de l'attraction

A.6.2 Existence d'un mode de glissement

Une condition d'existence d'un mode glissant est une phase d'attractivité locale de la surface. Pour cela, les vecteurs vitesses $f(X, t, u)$ doivent pointer vers la surface de glissement. Dans la pratique, les trajectoires ne restent pas exactement sur la surface (il s'agirait alors d'un mode de glissement idéal) ; c'est pourquoi on définit D_g le domaine de glissement qui est la partie de la

surface de glissement dans laquelle les trajectoires vont rester. On définit donc u de manière à ce que $f(X, t, u)$ pointe vers la surface de glissement pour tout X de Ω et qu'à partir d'un certain état les trajectoires restent dans D_g . La commande est établie de la sorte :

$$u(X, t) = \begin{cases} u^+(X, t) & \text{si } X \in s^+ \\ u^-(X, t) & \text{si } X \in s^- \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Avec u^+ et u^- continues et non égales. Le théorème d'Utkin nous fournit une condition suffisante à l'existence d'un mode de glissement :

Théorème A.6.1 *Pour que D_g soit un domaine de glissement pour le système formé par A.4 et A.7, il suffit que pour tout $X \in D_g$, il existe une fonction de Lyapunov $V(X, s, t)$ définie et continûment différentiable vis-à-vis de tous ses arguments sur un ensemble η contenant l'origine et vérifiant :*

1. $V(X, s, t)$ est définie positive par rapport à s : $\begin{cases} V(X, s, t) > 0 & \text{si } S \neq 0 \\ V(X, s, t) = 0 & \text{sinon} \end{cases}$
2. Pour tout $R \in \mathbb{R}^{+*}$, pour tout $X \in D_g$ et pour tout t , V vérifie :
 $\lim_{R \rightarrow 0} \left(\sup_{||s=R||} V(X, s, t) \right)$
3. La dérivée totale de V le long des trajectoires du système est définie négative pour toute $s(X, t)$ non nulle.
4. Sur $||s|| = R$ et en dehors des points de discontinuités, pour $(R_1, R_2) \in \mathbb{R}^{+*2}$ avec $R_1 < R_2$:
 $v = - \sup_{||s=R||} \frac{dV}{dt}, V > 0, \quad \inf_{R \in [R_1, R_2]} v > 0$

On utilise le plus fréquemment :

$$\begin{aligned} V(X, s, t) &= \frac{s^2}{2} \\ V(X, s, t) &= \frac{s^4}{4} \\ V(X, s, t) &= |s| \end{aligned}$$

Ainsi, par exemple, pour $V(X, s, t) = \frac{s^2}{2}$, la condition d'existence d'un mode glissant (appelé condition de glissement) est :

$$\dot{s}s < 0 \quad (\text{A.8})$$

Cependant cette condition n'assure qu'une convergence asymptotique vers $s = 0$. Nous la remplaçons donc le plus souvent par :

$$\dot{s}s \leq -\eta|s| \text{ avec } \eta > 0 \quad (\text{A.9})$$

La condition A.9 assure une convergence en un temps fini borné :

$$t_{fini} \leq \frac{|s(X, 0)|}{\eta} \quad (\text{A.10})$$

A.6.3 Avantage et inconvénient des modes glissants d'ordre 1

Le principal avantage d'une telle commande réside dans sa robustesse. Effectivement, nous admettrons que les modes glissants d'ordre 1 sont robustes vis-à-vis de certaines perturbations internes et externes du système. C'est-à-dire que ces perturbations n'empêchent pas la convergence vers le domaine de glissement et qu'une fois à l'intérieur de celui-ci, la réponse du système y reste même sous perturbations. De plus, cette commande est relativement simple à mettre en oeuvre. Cependant, elle souffre d'un inconvénient majeur : le chattering ou phénomène de réticence.

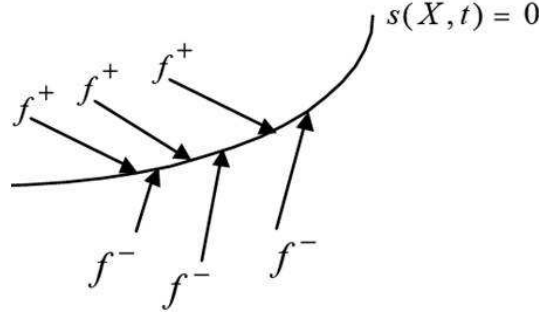


FIG. A.11: Illustration du phénomène de réticence

Cette oscillation à haute fréquence autour de la surface de glissement est dû au fait qu'il n'existe pas d'actionneur capable de faire commuter la commande entre u_+ et u_- avec une fréquence infinie. Ainsi la réponse oscille entre les "bords" du domaine D_g . Cela peut tout d'abord entraîner une usure prématurée des actionneurs, une utilisation d'énergie importante et une excitation des modes à hautes fréquences non pris en compte dans la modélisation du système.

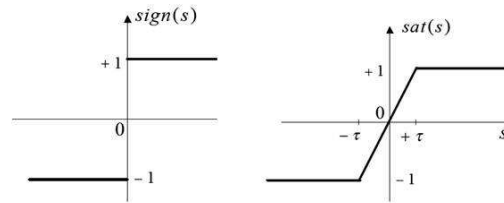


FIG. A.12: Allure de $\text{sign}(s)$ et de $\text{sat}(s)$

On peut contrer le phénomène en utilisant une fonction approchée de $\text{sign}(s)$ (figure A.12) (fonction saturation ou sigmoïde par exemple) mais cette solution entraîne une modification des performances et de la robustesse du correcteur. Il faut donc faire un compromis entre robustesse, performance et réticence en jouant sur le paramètre τ de la fonction utilisée pour approcher sign .