

Contribution à la surveillance temps-réel du système "Conducteur - Véhicule - Environnement" : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite

Jean-Philippe Lauffenburger

▶ **To cite this version:**

Jean-Philippe Lauffenburger. Contribution à la surveillance temps-réel du système "Conducteur - Véhicule - Environnement" : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite. Automatique / Robotique. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2002. Français. NNT : . tel-00732949

HAL Id: tel-00732949

https://theses.hal.science/tel-00732949

Submitted on 17 Sep 2012

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

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

Jean-Philippe LAUFFENBURGER

Contribution à la surveillance temps-réel du système «conducteur - véhicule - environnement» : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite

Numéro d'ordre : 02MULH0706 Année 2002

École Doctorale
de la Molécule
aux Matériaux et aux Systèmes

THÈSE

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université de Haute Alsace

[arrêté du 30 mars 1992]

Spécialité : Électronique - Électrotechnique - Automatique

par

Jean-Philippe LAUFFENBURGER

Contribution à la surveillance temps-réel du système "Conducteur - Véhicule - Environnement" : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite

---

Soutenue publiquement le 20 décembre 2002 devant la commission d'examen composée de :

Nadine LEFORT-PIAT	*Professeur à l'ENSMM, Besançon*	Rapporteur externe
Luc DUGARD	*Directeur de Recherche CNRS, Grenoble*	Rapporteur externe
Xavier MOREAU	*Maître de conférences, UFR de Physiques, Bordeaux*	Examinateur
Julien GRESSER	*Professeur à l'Université de Haute Alsace, Mulhouse*	Examinateur
Michel BASSET	*Maître de conférences à l'ESSAIM, Mulhouse*	Co-directeur de thèse
Gérard GISSINGER	*Professeur à l'ESSAIM, Mulhouse*	Directeur de thèse

Laboratoire : **M**odélisation **I**ntelligence **P**rocessus **S**ystèmes (MIPS)
Equipe : **M**odélisation et **I**dentification en **A**utomatique et **M**écanique - Cellule *Automatique & Automobile*

À ma grand-mère,
À mon grand-père,
À ma famille.

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre d'un partenariat avec la *Région Alsace*. Que Monsieur Olivier Guyot (de la Direction de la Recherche, de l'Enseignement Supérieur et du Transfert de Technologie) trouve ici l'expression de ma reconnaissance et de ma profonde gratitude pour l'intérêt accordé à ce projet.

Ce travail a été conduit dans l'équipe **M**odélisation et **I**dentification en **A**utomatique et **M**écanique sous la direction conjointe de son Directeur Monsieur Gérard-Léon GISSINGER, et de Monsieur Michel BASSET, Maître de Conférences à l'ESSAIM. Qu'ils soient remerciés pour leur accueil au laboratoire ainsi que pour leur rigueur et leurs conseils sur mon travail.

Je remercie Madame Nadine LEFORT-PIAT (Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon) et Monsieur Luc DUGARD (Directeur du **L**aboratoire d'**A**utomatique de **G**renoble) pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse, et pour l'attention avec laquelle ils ont lu mon mémoire. Je remercie également les autres membres de mon jury, Monsieur Xavier MOREAU (Maître de Conférences à l'UFR de Physiques de Bordeaux) et Monsieur Julien GRESSER (Professeur à l'Université de Haute Alsace) pour leurs commentaires et remarques pertinentes.

Je remercie l'ensemble du département GEII de l'IUT de Mulhouse et plus particulièrement Monsieur Serge JACQUEY, l'équipe Lab.el pour le soutien et la confiance qu'ils m'ont accordé en me permettant d'effectuer mon monitorat et mon service d'ATER dans leur département.

Je tiens également à adresser des remerciements plus décontractés mais néanmoins chaleureux et sincères à toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidé, conseillé et encouragé notamment :

- Madame Florence BRUNET (de la tranche T41-50...) qui, malgrè toutes mes allusions et blagues misogynes, a bien voulu faire mon thème astral,
- Monsieur Sébastien BERGER et sa femme Jeanne pour m'avoir fait prendre conscience que des amis, ça se méritait (dans leur cas, il a fallu participer à trois de leurs déménagements...),
- Monsieur Olivier HAEBERLE (le plus japonais des alsaciens que je connaisse) qui m'a permis de finir, **SEUL**, les travaux de réalisation des étudiants de l'IUT alors qu'il s'exilait au Japon (il s'est heureusement rattrapé en me proposant de relire ce mémoire...),
- Monsieur Pierre LAURENCE, collègue de chambré de mon bureau virtuel, dont les connaissances en dynamique véhicule n'ont d'égal que ses compétences de turfiste ou de chasseur ;-)
- Monsieur Jérome BAUJON, doctorant, commercial et partenaire industriel à la fois, qui m'a fait découvrir qu'une voiture est équipée de rétroviseurs...,
- Monsieur Alfonso PORCEL, pour son optimiste à toute épreuve ("Mâ chi lé meuble y rentre dans ta voitoure ! !"),

– Monsieur Bruno ZAMI, thésard CIFRE (de temps en temps...) que je soutiens de tout cœur dans sa tri-thérapie (natation, cyclisme et course à pied...),

– Monsieur Eduardo HARO (alsaco-mexico-grenoblois de son état) à qui j'ai promis des piments super-forts au début de l'été et qui a reçu 3 trucs desséchés au moins d'octobre...,

– Monsieur Cyrille PETITJEAN (LittleJohn, KleinHanz, PequiñoJuan... suivant les pays...), du côté obscur de la force. Grâce à lui, j'ai pris conscience qu'un véhicule à quatre roues pouvait ne pas être une voiture et ne roulait pas forcément,

– Monsieur Guillaume GIRARDIN, étudiant à l'ESSAIM et accessoirement système d'assistance intelligent du piètre conducteur que j'ai pu être durant nos essais. J'ai réalisé en sa compagnie que de supprimer une commande au conducteur ne facilitait pas forcément la tâche de conduite... ;–),

– Monsieur Joël LAMBERT, technicien à l'ESSAIM, sans qui le véhicule expérimental ne serait encore qu'un rêve (faudra quand même penser à remonter correctement le volant un jour...),

– le propriétaire et l'ensemble du personnel du Shamrock où je me suis souvent réfugié (avec certains acolytes mentionnés dans ces remerciements d'ailleurs) pour me changer/noyer les idées,

– l'ensemble de mes collègues, amis de Mulhouse et d'ailleurs...

Bien évidemment, une pensée toute particulière pour mes parents et ma sœur qui m'ont encouragé et soutenu durant toutes ces années d'étude.

Jean-Philippe LAUFFENBURGER

Table des matières

Table des figures vii

Liste des tableaux ix

Références personnelles xi

Introduction générale 1

I. Contexte 5

1. Le système "conducteur-véhicule-environnement" 7
1.1. Introduction . . . 7
1.2. Complexité du système . . . 8
1.3. Le véhicule . . . 9
1.4. Le conducteur . . . 11
1.4.1. L'activité de conduite . . . 11
1.4.1.1. Hiérarchie des tâches de conduite . . . 11
1.4.1.2. Prise et analyse d'informations . . . 12
1.4.1.3. Prise de décisions et actions de commande . . . 13
1.4.2. Modélisation du conducteur . . . 13
1.4.2.1. Démarches de modélisation . . . 13
1.4.2.2. Modèles comportementaux . . . 14
1.4.2.3. Modèles cognitifs . . . 16
1.4.3. Classification du conducteur . . . 18
1.4.3.1. Classification selon l'état civil . . . 18
1.4.3.2. Classification selon l'expérience, les caractéristiques physiques et psychologiques 18
1.4.3.3. Classification selon des mesures proprioceptives . . . 19
1.4.3.4. Classification selon des mesures extéroceptives . . . 21
1.5. Conclusion . . . 21

2. Vers une assistance au conducteur 23
2.1. Introduction . . . 23
2.2. Assistance, conduite automatisée et route intelligente : état de l'art . . . 24
2.2.1. La conduite automatisée . . . 24
2.2.2. La route intelligente . . . 25
2.2.3. L'assistance à la conduite . . . 26
2.2.3.1. Assistance à la commande . . . 26
2.2.3.2. Assistance à la navigation . . . 26
2.2.4. L'assistance au conducteur dans le système "conducteur-véhicule-environnement" . . . 27

2.2.4.1. Les niveaux d'assistance . . . 28
2.2.4.2. Coopération conducteur - système d'assistance . . . 28
2.2.4.3. Le conducteur au cœur du développement . . . 29
2.2.5. L'insécurité liée à l'assistance . . . 29
2.2.6. De nombreux projets d'assistance . . . 30
2.3. Le projet "*Navigation Aided Intelligent Cruise Control*" . . . 31
2.3.1. Objectifs généraux . . . 31
2.3.2. Phases d'évolution du projet . . . 32
2.3.3. Stratégie . . . 33
2.3.3.1. Estimation, adaptation et reconfiguration . . . 33
2.3.3.2. Coopération NAICC - conducteur . . . 33
2.3.4. Structure du système d'aide à la conduite . . . 34
2.3.4.1. Localisation du véhicule et détection de l'environnement . . . 34
2.3.4.2. Assistance longitudinale : régulation adaptative de vitesse . . . 35
2.3.4.3. Assistance latérale : contrôle de trajectoire . . . 36
2.3.5. Couplage des assistances longitudinale et latérale . . . 36
2.3.6. Objectif global de la thèse . . . 37
2.4. Conclusion . . . 37

II. Contribution à l'assistance latérale et longitudinale d'un véhicule 39

3. Modélisation du conducteur pour l'assistance latérale à la conduite 41
3.1. Introduction . . . 42
3.1.1. Objectifs . . . 42
3.1.2. Méthodologie . . . 43
3.2. Planification et génération de trajectoires : état de l'art . . . 43
3.2.1. Chemins à courbure discontinue . . . 44
3.2.2. Chemins à courbure continue . . . 44
3.2.2.1. Chemins à courbure polynomiale . . . 45
3.2.2.2. Chemins à coordonnées polynomiales . . . 46
3.2.3. Approches retenues . . . 47
3.3. Splines polaires . . . 47
3.3.1. Notations . . . 48
3.3.2. Repère polaire . . . 48
3.3.2.1. Courbure dans le repère polaire . . . 48
3.3.2.2. Vitesse et accélération dans le repère polaire . . . 49
3.3.3. Formalisme selon Nelson . . . 50
3.3.3.1. Expression générale d'un spline polaire . . . 50
3.3.3.2. Conditions de continuité . . . 50
3.3.3.3. Remarques . . . 50
3.3.4. Généralisation . . . 51
3.3.4.1. Intégration de contraintes cinématiques et dynamiques . . . 51
3.3.4.2. Transition à vitesses différentes . . . 52
3.3.4.3. Transition à courbure non nulle . . . 52
3.4. Le conducteur : étude trajectographique . . . 53
3.4.1. "Points objectifs" d'une trajectoire en courbe . . . 54
3.4.2. Analyse de la trajectoire en courbe . . . 56
3.4.2.1. Domaine et repère d'étude . . . 56
3.4.2.2. Conditions d'expérimentation . . . 57
3.4.2.3. Le conducteur "inexpérimenté" . . . 58
3.4.2.4. Le conducteur "très expérimenté" . . . 60
3.4.2.5. Remarques . . . 62
3.4.3. Identification du modèle . . . 62

3.5. Identification du modèle polaire . . . 64
3.5.1. Indicateurs du comportement conducteur et environnement . . . 64
3.5.2. Quantification objective des indicateurs du comportement conducteur . . . 65
3.5.2.1. Identification de la position angulaire des “points objectifs” . . . 66
3.5.2.2. Identification de la position latérale des “points objectifs” . . . 66
3.5.2.3. Estimation des points de jonction par logique floue . . . 69
3.5.2.4. Estimation des pentes et courbures aux points de jonction . . . 71
3.5.3. Application à la génération automatique de trajectoires . . . 71
3.5.3.1. Principe . . . 72
3.5.3.2. Repère et formalisme général . . . 72
3.5.3.3. Polynômes G-SCP . . . 73
3.6. Suivi de trajectoires : état de l'art . . . 75
3.6.1. Commande par distance de pré-visualisation . . . 76
3.6.2. Commande par modèle véhicule . . . 77
3.6.3. Synthèse . . . 79
3.7. Conclusion . . . 79

4. Régulation de vitesse assistée par un système de localisation 81
4.1. Introduction . . . 81
4.1.1. Contexte . . . 81
4.1.2. Problématique et méthodologie . . . 82
4.2. L'asservissement longitudinal . . . 83
4.2.1. Régulation sans perception de l'environnement . . . 83
4.2.2. Régulation par perception de l'environnement . . . 83
4.2.2.1. Gestion de l'environnement “dynamique” . . . 84
4.2.2.2. Gestion du profil routier . . . 85
4.3. L'assistance longitudinale de NAICC . . . 86
4.3.1. Principe . . . 86
4.3.2. Domaine de validité . . . 86
4.4. Estimation des sollicitations longitudinales . . . 87
4.4.1. Estimation de la vitesse de consigne . . . 87
4.4.1.1. Modèle de Damianoff . . . 87
4.4.1.2. Critère de sécurité et de confort de conduite . . . 88
4.4.2. Modélisation de la phase de freinage . . . 88
4.4.2.1. Notion de “Time-To-Collision” . . . 89
4.4.2.2. Principe du véhicule virtuel . . . 89
4.5. Modélisation de l'activité longitudinale par un automate d'états finis . . . 90
4.5.1. Entrées de l'automate . . . 91
4.5.2. Etats de l'automate . . . 92
4.5.3. Sorties générées . . . 92
4.6. Conclusion . . . 93

III. Validation des concepts développés 95

5. Localisation multisensorielle d'un véhicule routier 97
5.1. Introduction . . . 98
5.2. Principes généraux de la fusion de données . . . 98
5.2.1. Modèle fonctionnel . . . 98
5.2.2. Architectures de fusion . . . 99
5.2.2.1. Architectures de bas niveau . . . 100
5.2.2.2. Architecture de haut niveau . . . 101
5.3. Méthodes de fusion de données multisensorielles . . . 102
5.3.1. Théorie ensembliste . . . 102
5.3.2. Approche statistique : le filtrage de Kalman . . . 103

5.3.3. Approche statistique : alternative au filtre de Kalman . . . 105
5.3.4. Approche probabiliste : le filtrage particulaire . . . 105
5.4. Fusion de données pour le positionnement d'un véhicule routier . . . 106
5.4.1. Principe de positionnement . . . 106
5.4.2. Sélection des informations pour le positionnement . . . 107
5.4.3. Choix de l'estimateur . . . 108
5.4.4. Théorie du filtrage de Kalman . . . 108
5.4.5. Processus non-linéaire : filtre de Kalman étendu . . . 110
5.4.6. Modèle d'évolution du véhicule . . . 111
5.5. Architecture hybride développée . . . 112
5.5.1. Architecture d'estimation et de fusion . . . 113
5.5.2. Estimation de l'angle et de la vitesse de lacet . . . 114
5.5.2.1. Filtre formeur . . . 114
5.5.2.2. Modèle d'évolution . . . 115
5.5.2.3. Modèle d'observation de la vitesse de lacet . . . 116
5.5.3. L'EKF pour la fusion DGPS-mesures proprioceptives . . . 116
5.5.3.1. Modèle d'évolution de l'EKF . . . 116
5.5.3.2. Modèle d'observation des mesures du DGPS . . . 116
5.5.3.3. Modélisation des sources d'erreurs . . . 117
5.5.3.4. Etape de prédiction . . . 117
5.5.3.5. Etape de correction . . . 118
5.6. Localisation et modélisation du profil routier . . . 118
5.6.1. Contexte . . . 118
5.6.2. Courbes de Bézier . . . 120
5.6.2.1. Polygône de contrôle . . . 120
5.6.2.2. Polynômes de Bernstein . . . 120
5.6.2.3. Définition d'une courbe de Bézier . . . 121
5.6.3. Modélisation du profil routier . . . 122
5.6.3.1. Détermination des points d'ancrage . . . 122
5.6.3.2. Algorithme d'optimisation . . . 122
5.6.3.3. Structure de la base de données . . . 122
5.6.4. Localisation par corrélation cartographique . . . 123
5.7. Conclusion . . . 123

6. Résultats expérimentaux **125**
6.1. Introduction . . . 125
6.2. Plate-forme expérimentale NADINE . . . 126
6.2.1. Objectifs . . . 126
6.2.2. Architecture matérielle . . . 127
6.2.3. Capteurs proprioceptifs . . . 128
6.2.4. Capteur extéroceptif : le DGPS . . . 129
6.2.5. Organe de commande : le régulateur de vitesse . . . 131
6.2.6. Transmission des données . . . 132
6.3. Architecture logicielle d'acquisition et de commande . . . 134
6.3.1. Schéma d'exécution . . . 135
6.3.2. Systèmes et logiciels embarqués : l'approche orientée objet . . . 135
6.3.3. Architecture globale d'acquisition et de commande . . . 136
6.3.4. Application à l'acquisition et à la commande embarquées . . . 138
6.4. Validation de la fusion multisensorielle . . . 139
6.4.1. Estimation de la vitesse de lacet et de l'angle de lacet . . . 139
6.4.2. L'EKF pour la fusion DGPS-mesures extéroceptives . . . 141
6.4.3. Modélisation du profil routier . . . 144
6.4.3.1. Découpe du profil routier . . . 144
6.4.3.2. Modélisation par courbes de Bézier . . . 145
6.5. Génération de trajectoires pour la commande latérale . . . 146

6.5.1. Modélisation de trajectoires . . . 146
6.5.1.1. Conducteur “inexpérimenté” . . . 146
6.5.1.2. Conducteur “très expérimenté” . . . 147
6.5.2. Génération automatique de trajectoires . . . 147
6.6. Régulation de vitesse assistée par un dispositif de localisation . . . 148
6.6.1. Implémentation pour la validation embarquée . . . 148
6.6.1.1. Validation en simulation . . . 148
6.6.1.2. Validation en simulation “temps-réel” . . . 149
6.6.1.3. Validation en conditions réelles . . . 149
6.6.1.4. Modèle Simulink . . . 150
6.6.2. Simulation . . . 150
6.6.2.1. Contexte et hypothèses . . . 150
6.6.2.2. Résultats . . . 151
6.6.3. Test embarqué . . . 152
6.6.3.1. Contexte et hypothèses . . . 152
6.6.3.2. Résultats . . . 153
6.7. Conclusion . . . 153

Conclusion générale **155**

Bibliographie **159**

Annexes 168

A. Estimation des données gyrométriques : Covariance du bruit d'état **171**
A.1. Modèle continu de l'estimateur . . . 171
A.2. Discrétisation du modèle . . . 171
A.3. Matrice de covariance du bruit d'état . . . 172

B. Fusion multisensorielle pour la localisation : Covariances du filtre de Kalman étendu **173**
B.1. Linéarisation du processus . . . 173
B.2. Bruits de mesure, d'état et d'observation . . . 173

C. Splines polaires : Expressions formelles des paramètres **175**
C.1. Hypothèses et formulation générale . . . 175
C.2. Définition du système d'équations . . . 176
C.3. Résolution formelle . . . 176

Table des figures

1.1. Le conducteur dans son milieu d'évolution . . . 8
1.2. Modèle "lacet-dérive" . . . 10
1.3. Hiérarchisation des tâches de conduite . . . 12
1.4. Le conducteur en tant qu'organe de commande . . . 13
1.5. Structures de modèles conducteur . . . 14
1.6. Le modèle conducteur à deux niveaux selon [DON78] . . . 15
1.7. Modèle conducteur de Afonso *et al.* [AFO93] . . . 16
1.8. Modèle cognitif selon [RAS83] . . . 17
1.9. Exemple d'un diagramme G-G . . . 20

2.1. Principe de UDC ("*Urban Drive Control*") . . . 25
2.2. Le système "conducteur-véhicule-environnement-copilote" selon [YUH98] . . . 27
2.3. Structure décisionnelle hiérarchique . . . 28
2.4. Structure décisionnelle hétérarchique . . . 29
2.5. Structure de NAICC . . . 32
2.6. Stratégie générale de NAICC . . . 33
2.7. Coopération horizontale entre NAICC et le conducteur . . . 34
2.8. NAICC : l'assistance longitudinale . . . 35
2.9. NAICC : l'assistance latérale . . . 36

3.1. Asservissement d'un véhicule par génération de trajectoire . . . 43
3.2. Exemple de clothoïde . . . 45
3.3. Une spirale cubique (a), sa courbure (b), les dérivées $1^{\text{ère}}$ (c) et 2^{nde} (d) de la courbure . . . 45
3.4. Repère polaire pour une transition "segment-courbe-segment" . . . 49
3.5. Transition à vitesses différentes . . . 52
3.6. "Points objectifs" remarquables de la trajectoire en virage . . . 55
3.7. Domaine d'étude et repère associé . . . 56
3.8. Circuit "l'Anneau du Rhin" de Biltzheim . . . 57
3.9. Trajectoire et rayon de courbure : virage 14 . . . 59
3.10. Diagramme G-G : virage 14 . . . 60
3.11. Trajectoire et rayon de courbure : virage 14 . . . 61
3.12. Diagramme G-G : virage 14 . . . 62
3.13. Procédé d'identification du modèle . . . 65
3.14. Rayon au point de corde en fonction du rayon du virage . . . 67
3.15. Point de corde suivant les caractéristiques (R, α) du profil routier . . . 68
3.16. Partitions floues - Conducteur "inexpérimenté" . . . 70
3.17. Hypersurfaces des constantes floues - Conducteur "inexpérimenté" . . . 70
3.18. Repère de définition de la transition . . . 72
3.19. Comparaison entre SCP et G-SCP et leur courbure respective . . . 74
3.20. Suivi de trajectoire à courbure continue (extrait de [BAR01]) . . . 75

3.21. Technique de poursuite de cible . . . 76
3.22. Minimisation des erreurs de position et de cap . . . 77
3.23. Modèle à multiples informations prédictives . . . 78

4.1. Télécommande & récepteur HF du véhicule NADINE . . . 84
4.2. "Adaptive Front-lighting System" (Extrait de "Seeing and being seen", *Valéo*) . . . 86
4.3. Caractérisation de la phase de freinage . . . 89
4.4. Automate de la régulation de vitesse . . . 91

5.1. Modèle fonctionnel de la fusion de données selon [ANT95] . . . 99
5.2. Architecture centralisée de fusion . . . 100
5.3. Architecture autonome de fusion . . . 101
5.4. Architecture hybride de fusion . . . 101
5.5. Modèle "***blackboard***" . . . 102
5.6. Filtrage à faible couplage selon [WEN00] . . . 104
5.7. Filtrage à fort couplage selon [WEN00] . . . 104
5.8. Principe du filtrage particulaire . . . 106
5.9. Filtrage de Kalman discret . . . 109
5.10. Modèle simplifié de prise de virage . . . 112
5.11. Architecture du module de positionnement . . . 113
5.12. Modélisation d'un système avec un filtre formeur sur le bruit d'observation . . . 115
5.13. Principe de prédiction-correction . . . 118
5.14. Représentation d'une courbe de Bézier : pentes et points d'ancrage . . . 121

6.1. Véhicule expérimental . . . 126
6.2. Architecture du véhicule NADINE . . . 127
6.3. Centrale inertielle du véhicule NADINE . . . 128
6.4. Dispositif de mesure de l'angle de braquage . . . 130
6.5. Commande du régulateur par l'"Autolab" . . . 131
6.6. Module de commande de l'actionneur "angle papillon" selon [GIR02] . . . 132
6.7. Système d'acquisition et de commande : "Autolab" et PC industriel . . . 133
6.8. Principe de communication maître/escalve . . . 134
6.9. Architecture d'exécution . . . 135
6.10. Diagramme de classes de la micro-architecture "*Composite*" . . . 136
6.11. Architecture de gestion des entrées/sorties - Diagramme de classes . . . 137
6.12. Signal de sortie du gyromètre (a), intégrale du signal et angle de lacet estimé (b) . . . 140
6.13. Estimation du filtre formeur (a) et séquence d'innovation du filtre de Kalman (b) . . . 140
6.14. Vitesse de lacet mesurée (a) et estimation de l'angle de lacet (b) . . . 140
6.15. Estimation du filtre formeur (a) et séquence d'innovation du filtre de Kalman (b) . . . 141
6.16. Avant et après estimation de l'angle de lacet par filtrage de Kalman . . . 142
6.17. Fusion des informations par EKF . . . 142
6.18. Erreurs d'estimation en x et y . . . 143
6.19. Détermination des sections curvilignes d'un tracé DGPS . . . 144
6.20. Représentation d'une portion de la piste du GIAT par des courbes de Bézier . . . 145
6.21. Modélisation de trajectoire et sollicitations associées . . . 146
6.22. Modélisation de trajectoire et sollicitations associées . . . 147
6.23. Génération de trajectoires : conducteur "inexpérimenté" et "très expérimenté" . . . 148
6.24. Principe de la validation en simulation . . . 149
6.25. Validation en simulation "temps-réel" . . . 149
6.26. Interface du module longitudinal . . . 150
6.27. Validation en simulation . . . 151
6.28. Distance de freinage appropriée . . . 152
6.29. Validation en conditions réelles . . . 153

Liste des tableaux

1.1. Caractérisation selon [ROT93] 18

3.1. Symboles relatifs aux polynômes polaires 48
3.2. Pentes et caps aux points de jonction - Conducteur “inexpérimenté” 71
3.3. Pentes et caps aux points de jonction - Conducteur “très expérimenté” 71

4.1. Variables de calcul du modèle de Damianoff [DAM81] 88

5.1. Evolution des performances des systèmes embarqués selon [PAN02] 108
5.2. Applications basées sur l’utilisation d’une cartographie selon [PAN02] 119

6.1. Variances des bruits du modèle 139
6.2. Points de Bézier utilisés pour construire le profil de la figure 6.20 145

Références personnelles

Synthèse

Types d'articles	Nombre
Publications	3
Conférences internationales à comité de lecture	4
Conférences nationales à comité de lecture	2
Workshop à comité de lecture	1
Démonstration à une conférence internationale	1

Publications

J. Ph. Lauffenburger, M. Basset, F. Coffin, G. L. Gissinger
Driver-aid system using path-planning for lateral vehicle control
Control Engineering Practice, volume 11/2, pp. 215-229, Février 2003

J. Ph. Lauffenburger, J. Baujon, M. Basset, G. L. Gissinger[1]
The NAICC Project : a Navigation Aided Intelligent Cruise Control
SAE2000 Transactions, Journal of Passenger Car - Electronic & Electrical Systems
Book V109-7, ISBN 0-7680-0891-3, 2001
Recueil de 75 publications sélectionnées parmi l'ensemble des travaux présentés à la conférence SAE2000

J. Ph. Lauffenburger, J. Baujon, M. Basset, G. L. Gissinger
The NAICC Project : a Navigation Aided Intelligent Cruise Control
ITS Navigation Systems, SAE Book, SP1538, 2000
Recueil de 27 publications présentées dans la section ITS (Intelligent Transportation Systems)
de la conférence SAE2000

Communication invitée à une conférence internationale

J. Ph. Lauffenburger, F. Coffin, M. Basset, G. L. Gissinger
A Vehicle Path-Planning Algorithm using Polar Polynomials Optimised through Fuzzy-Logic
IFAC International Conference on Mechatronic Systems, vol. 1, pp. 139-144
Darmstadt, Allemagne, 2000

[1]Initialement soumis sous forme de communication à la conférence internationale de la Société des Ingénieurs en Automobile SAE2000, ces travaux ont été retenus pour être publiés dans deux recueils.

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

G.L. Gissinger, M. Basset, J. Ph. Lauffenburger, J. Baujon
Le Projet NAICC : une régulation de vitesse intelligente assistée par le système de navigation pour véhicule automobile
CIMASI'02, Casablanca, Maroc, 2002

J. Ph. Lauffenburger, J. Baujon, M. Basset, G. L. Gissinger
The NAICC Project : a Navigation Aided Intelligent Cruise Control
SAE Technical Paper N°2000-01-1300, SAE World Congress, Detroit, USA, 2000

J. Baujon, J. Ph. Lauffenburger, Ph. Chéron, M. Basset, G. L. Gissinger
A New Low-Cost Tool for Driver Behavior Analysis and Studies
IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 569-574, Dearborn, USA, 2000

Workshop et conférences nationales

J. Ph. Lauffenburger, J. Baujon, M. Basset, G. L. Gissinger
A Speed Estimation Algorithm for an Intelligent Driver Aid System
IAR (French-German Institute for Automation and Robotics) Annual Workshop, pp. 27-32, Nancy, 2000

M. Basset, J. Ph. Lauffenburger, J. Baujon, G.L. Gissinger
Système intelligent d'aide à la conduite : Projet NAICC
Journée Automatique & Automobile, Bordeaux, 1999

J. Ph. Lauffenburger, F. Coffin, M. Basset, G. L. Gissinger
Identification de trajectoires de véhicules routiers par polynômes polaires généralisés
Journée CRESPIM (Centre de Recherche et d'Enseignement des Sciences Pour l'Ingénieur de Mulhouse) Mulhouse, 1999

Démonstration

J. Ph. Lauffenburger, M. Basset, G. L. Gissinger
The NAICC Project : a Location-based Driver Aid System
Invitation à présenter le projet NAICC parmi les projets européens concernant le véhicule intelligent
IV2002, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Versailles, 19-21 juin 2002

Introduction générale

"Il faut avoir déjà beaucoup appris de choses pour savoir demander ce qu'on ne sait pas."

Jean-Jacques Rousseau

La mobilité (et donc les transports) est à l'origine de nombreuses découvertes, d'abord de terres inconnues et ensuite de civilisations nouvelles. Les transports ont ainsi permis à l'homme d'étendre continuellement son espace, d'augmenter et de faciliter ses activités, en d'autres termes de repousser ses limites. L'automobile constitue un des moyens de transport favorisant ce développement incessant. Pratique, voire incontournable pour beaucoup, elle est à présent au cœur de toutes les controverses : on l'accuse à la fois de nécessiter trop de ressources et de générer trop de nuisances, d'être un facteur d'inéquité sociale... Paradoxalement, ce mode de transport ne cesse de faire des émules. Il est donc primordial, pour garantir une **mobilité durable**, de s'intéresser à ces points qui ternissent l'image de l'automobile, jusqu'à présent épargnée.

Dans ce contexte d'augmentation perpétuelle du trafic, il est vital de **garantir et d'accroître la sécurité des déplacements**. Ce point est d'ailleurs devenu un des chevaux de bataille du nouveau gouvernement. Pourtant, à l'heure où les dernières statistiques accidentologiques viennent de paraître, le constat est une nouvelle fois alarmant. La France dénombre, pour l'année écoulée, plus de 8000 morts sur les routes et conserve ainsi son triste titre de pays européen le plus meurtrier en matière de circulation routière. Les causes sont identifiées depuis bien longtemps : vitesse excessive, conduite sous l'emprise d'un état alcoolique, non respect des règles de sécurité... Elles sont regroupées autour d'un facteur récurrent : le conducteur.

Pour l'heure, ce constat est un catalyseur pour les chercheurs du domaine. Si, en matière de sécurité routière, des résultats probants pourraient être obtenus par un changement des mentalités des conducteurs (allant à l'encontre de la culture française), les scientifiques n'ont que très peu d'espoir d'y parvenir. Ce changement culturel vise à promouvoir la **sécurité "naturelle"** en valorisant, auprès des acheteurs potentiels, les organes de sécurité et de confort plutôt que la puissance et la vitesse. Un recours consiste à tirer profit de la formidable mutation technologique entamée depuis quelques années : l'augmentation de la puissance des calculateurs, le développement de bus de terrain favorisant la transmission fiable des données ou encore la miniaturisation sont au cœur des développements. L'objectif est de **concevoir des solutions durables pour des véhicules plus sûrs, davantage "à l'écoute" du conducteur mais aussi de l'environnement**. La "voiture intelligente" préfigure un changement radical dans le mode de transport certainement le plus populaire. Plutôt que de "véhicule intelligent", il conviendrait peut-être de parler de véhicule sensible, doté d'un ensemble de dispositifs renforçant et prolongeant les capacités du conducteur, ou paliant ses déficiences. Les progrès recherchés concernent alors trois fonctionnalités : la **perception**, la **localisation** et finalement la **communication**. Ces progrès visent également à faire évoluer le statut du véhicule, longtemps considéré comme un micro-environnement n'englobant que son propre conducteur. De plus en plus, l'automobile fera partie intégrante d'un réseau interactif, échangeant des informations sur sa position ou encore sur l'état du trafic.

Les sciences pour l'ingénieur et l'automobile

La convergence de deux secteurs particulièrement innovants, l'automobile et les sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC), confère un potentiel formidable pour la communauté des sciences pour l'ingénieur, et en particulier pour l'automaticien. Si les travaux concernant la dynamique véhicule remontent certainement avant les années 70, ils ont souvent fait face à des limitations principalement d'ordre matériel. Ainsi, on s'est rapidement intéressé à concevoir des modèles reproduisant les comportements d'un véhicule. Fonctions de l'application, les domaines de validité des modèles sont plus ou moins restreints du fait des hypothèses de modélisation. Citons pour exemple le modèle "lacet-dérive", mentionné dans le chapitre 1, et qui fait abstraction d'un grand nombre de phénomènes connus des dynamiciens. Celui-ci a eu l'avantage d'être rapidement applicable dans des systèmes embarqués, malgré la limitation de puissance de calcul de l'époque.

Maintenant que ces barrières technologiques tombent petit à petit, les automaticiens peuvent entrevoir les solutions considérées il y a peu comme utopiques. Même si le véhicule volant qui avait été envisagé pour le début du 3$^{\text{ème}}$ millénaire n'est pas d'actualité, la voiture n'est plus uniquement une histoire de mécanique. Toutes les disciplines regroupées autour des sciences pour l'ingénieur marquent leur arrivée dans l'automobile : électronique, traitement du signal, informatique... En outre, l'apparition des bus de terrain et des systèmes électroniques divers (calculateurs embarqués) permet de disposer d'un grand nombre d'informations inhérentes au véhicule et qui nécessitaient il y a peu de temps encore une instrumentation coûteuse. Celle-ci était en général un frein à l'intégration des systèmes pensés et élaborés par les chercheurs. Pour synthétiser, le développement des sciences et techniques a été tel, que des aides à la conduite étudiées dans le cadre de projets comme PROMETHEUS durant les années 80 sont envisageables et font peu à peu leur apparition dans des véhicules d'une nouvelle ère.

Problématique de la thèse

Ainsi, le sujet traité dans cette thèse se situe à l'interface de thématiques scientifiques diverses, et vise à **l'intégration dans une automobile de fonctions d'observation, de supervision, d'aide à la décision ou encore de commande**. Des dispositifs "actifs" indépendants sont apparus progressivement dans l'automobile : l'ABS, l'aide au freinage d'urgence, le régulateur de vitesse et depuis peu le régulateur de vitesse intelligent sont proposés dans de nombreux véhicules actuels. Partant du constat que la collaboration de l'ensemble de ces systèmes est plus efficace que leur fonctionnement en parallèle, l'objectif de cette thèse est le développement d'un dispositif global d'assistance à la conduite (DAC). Celui-ci a pour but ultime de signaler puis de corriger les faiblesses de conduite (vitesse trop élevée en courbe, écart par rapport à une trajectoire prédéfinie...) en tenant compte de l'évolution des paramètres du véhicule, du comportement du conducteur et de la topologie de la route. Contrairement aux assistances de bas-niveau (régulateur de vitesse, régulateur de vitesse intelligent...), celles de haut-niveau annoncées pour bientôt nécessiteront pour répondre au mieux aux exigences du conducteur de s'adapter à ce dernier. L'intégration dans le système "véhicule-conducteur-route" d'un tel dispositif passe, de fait, par une connaissance précise des interactions entre l'ensemble des acteurs du système. En outre, l'approche de modélisation, et particulièrement de **modélisation du conducteur, est primordiale pour garantir une individualisation de l'assistance**.

Ces recherches s'inscrivent dans le cadre du projet NAICC ("*Navigation Aided Intelligent Cruise Control*") développé par le laboratoire MIPS/MIAM avec le partenariat de la *Région Alsace*[2]. Ce projet est proposé en vue de l'amélioration du confort et de la sécurité du conducteur et de ses passagers. L'objectif général réside dans la conception d'une architecture globale de collaboration des systèmes d'assistance. Le choix a été fait de fournir une aide au conducteur lors de la prise de virage, qui est une des phases de conduite potentiellement dangereuses. Ces travaux de thèse visent d'une part, le couplage de deux dispositifs actuellement proposés (un régulateur de vitesse et un système de localisation), et d'autre part la modélisation trajectographique de différentes classes de conducteurs. Dans le premier cas, l'idée consiste à étendre les fonctionnalités du régulateur par l'ajout de la perception de l'environnement d'évolution du véhicule (localisation). Dans le deuxième cas, toujours en se basant sur la localisation, une trajectoire de référence fonction du conducteur et de la phase de conduite (prise de virage) est générée. Celle-ci sera utilisée par le DAC comme trajectoire de consigne. L'approche par **modèle**

[2]La *Région Alsace* a participé au financement à la fois de la thèse et du véhicule démonstrateur.

interne de trajectoires de différentes catégories de conducteurs a pour but de fournir, à terme, en temps-réel, une **assistance latérale correspondant au profil de l'automobiliste** et garantissant le confort de conduite.

Organisation du document

Le manuscrit est structuré autour de trois parties :

Première partie : Contexte

La mise au point de systèmes d'assistance et plus globalement de méthodes de commande (latérale, longitudinale, etc...) d'un véhicule requiert une bonne connaissance du contexte dans lequel les travaux s'inscrivent. Généralement, l'automaticien s'appuie pour cela sur la modélisation des différents éléments. L'objet de la première partie est de décrire le contexte "véhicule-conducteur-environnement" dans lequel s'inscrit le dispositif d'assistance développé durant cette thèse.

Des recherches dans le domaine de la sécurité routière nécessitent d'étudier le conducteur lui-même, et donc son activité de conduite dans sa globalité. Inconsciemment, le conducteur perçoit, lors de la conduite automobile, un grand nombre d'informations et de signaux, à la fois du véhicule et de l'environnement. En outre, ses performances sont directement liées à son état physique, psychologique ou tout simplement à son expérience de conduite. Le premier chapitre, essentiellement bibliographique, s'attache donc à décrire le conducteur dans son milieu d'évolution. Dans ce chapitre, nous sensibilisons le lecteur à la complexité de la tâche de conduite et à la difficulté de l'étude du conducteur. Nous introduisons, dans ce dernier cas, les principaux travaux de **modélisation** et de **classification** faisant référence, ainsi que leur champs d'application. La modélisation a pour objectif de fournir à l'automaticien une description du conducteur (sous forme de fonction de transfert généralement) utilisable par exemple lors du développement de nouveaux véhicules. La classification pourra être utilisée afin de définir des critères de conduite ou des traits de caractère de certains automobilistes. Nous nous baserons dans le chapitre 3 sur une telle classification afin d'effectuer une modélisation de trajectoires de deux classes de conducteurs.

Le chapitre 2 contient les fondements de l'assistance à la conduite nécessaires pour la suite des travaux. Nous décrivons en outre les différents niveaux d'assistance envisageables ainsi que l'objectif de cette thèse : le développement d'un dispositif d'assistance à la conduite. Nous exposons ainsi les deux axes de recherches que comporte NAICC et qui concernent la commande longitudinale et latérale assistée par un dispositif de la localisation. Ainsi, une fois le véhicule localisé dans une base de données cartographique, le dispositif définit le prochain virage à négocier, **identifie une trajectoire et sa vitesse associée**, en fonction de différents critères (type de conducteur, profil routier, caractéristiques véhicule). Ces différentes consignes permettront à terme d'entreprendre une commande longitudinale et latérale couplée.

Deuxième partie : Contribution à l'assistance latérale et longitudinale d'un véhicule

Après avoir décrit en détail les objectifs et phases du projet NAICC, nous présentons dans la deuxième partie du manuscrit les travaux consacrés à l'identification des modèles internes nécessaires pour la commande latérale et longitudinale du véhicule.

Le chapitre 3 présente l'étude comportementale de deux classes de conducteurs[3] ("inexpérimentés" et "très expérimentés") à partir des relevés trajectographiques de chacune d'entre elles. Cette méthode a pour but de définir, pour un conducteur et un virage donné (dont les caractéristiques sont définies dans la base de données du DAC), une trajectoire de référence (modèle interne) utilisable, par la suite, pour la commande latérale du véhicule. Un **modèle générique de trajectoire utilisant les "splines polaires"** est identifié afin de représenter les particularités des deux catégories de conducteurs lors de la prise de virage. L'originalité de la méthode réside, d'une part dans l'**identification des paramètres du modèle en fonction du profil routier**, et d'autre part dans **la possibilité de définir la vitesse nécessaire au suivi de cette trajectoire**. Ce dernier point est primordial pour effectuer à terme une **assistance couplée** (commande latérale et longitudinale associée). L'étude concernant l'axe transversal de NAICC aboutit finalement à une synthèse des techniques

[3] Ces catégories sont définies suivant l'état civil et l'expérience de conduite du sujet étudié.

envisageables de suivi de trajectoires. Dans cette dernière partie essentiellement bibliographique, différents procédés de commande latérale sont abordés afin de définir la solution potentielle pour notre application.

Le chapitre 4 propose les solutions retenues pour l'axe longitudinal, c'est-à-dire la régulation de vitesse selon le profil routier. Nous présentons, en outre, l'**automate d'états finis** implémenté pour la **représentation séquentielle de la tâche de conduite**. Celui-ci décrit la négociation d'un virage suivant 4 étapes et permet d'identifier le profil de vitesse en accord avec la situation (phase d'accélération, décélération...). Il se base sur l'estimation d'une vitesse de consigne en adéquation avec la phase de conduite à négocier. Cette consigne est obtenue en appliquant un critère de sécurité et de confort de conduite au modèle de trajectoire définit dans le chapitre précédent. Cette solution garantit l'utilisation d'une consigne de vitesse en adéquation avec la trajectoire à suivre.

Troisième partie : Validation des concepts développés

La troisième partie du mémoire s'attache à décrire, d'une part les méthodes mises en œuvre pour valider les concepts des chapitres 3 et 4, et d'autre part les résultats expérimentaux obtenus. Ainsi, afin de garantir un bon fonctionnement du dispositif d'assistance, une localisation précise du véhicule doit être effectuée.

Le chapitre 5 traite du module de perception de l'environnement (localisation) constituant la base de NAICC. Après une rapide présentation des concepts généraux de la **fusion de données multicapteurs**, nous présentons la solution par **filtrage de Kalman étendu**, retenue pour l'hybridation d'informations d'un GPS différentiel (DGPS) et de capteurs endogènes (gyromètre, capteur de vitesse). Enfin, ce chapitre décrit la méthode de **modélisation du réseau routier par courbes de Bézier** développée afin de construire une base de données conforme à l'objectif d'asservissement du véhicule. En effet, lorsque ces travaux ont été initiés (et actuellement encore) aucun dispositif de localisation ne disposait d'une cartographie routière suffisamment complète et précise pour envisager son utilisation dans l'optique de la commande d'un véhicule. On montre en outre dans cette partie que la solution retenue permet de palier à l'imprécision et l'incomplétude des bases de données actuelles en limitant néanmoins les ressources de stockage d'informations.

Afin de valider les concepts présentés dans l'ensemble du mémoire, une **plate-forme expérimentale** a été mise en œuvre durant cette thèse. Sur la base d'un véhicule Renault Scénic, celle-ci est composée d'**organes de mesure** (centrale inertielle, DGPS) et **de commande** (régulateur de vitesse) interconnectés à un **système d'acquisition et de commande**. Ce dernier accueille les algorithmes initialement évalués en simulation (sous Matlab/Simulink), sans nécessiter de développement spécifique pour leur adaptation temps-réel. Le chapitre 6 est consacré à la description de cet ensemble et présente également les résultats obtenus à la fois pour la localisation du véhicule, l'identification du profil de vitesse ou la modélisation et génération de trajectoires.

Finalement, une synthèse de ces travaux de thèse est effectuée afin d'évaluer les résultats déjà obtenus ainsi que les perspectives d'évolution.

Première partie .

Contexte

Chapitre 1

Le système “conducteur-véhicule-environnement”

“Un conducteur dangereux, c’est celui qui vous dépasse malgré tous vos efforts pour l’en empêcher.”

Woody Allen

Sommaire

1.1. Introduction **7**
1.2. Complexité du système **8**
1.3. Le véhicule **9**
1.4. Le conducteur **11**
1.4.1. L’activité de conduite 11
1.4.2. Modélisation du conducteur 13
1.4.3. Classification du conducteur 18
1.5. Conclusion **21**

1.1. Introduction

Dans le domaine automobile, la mission de l’automaticien devient de plus en plus complexe. Elle consiste à présent à agir à de multiples niveaux n’ayant pas toujours été considérés par le passé. Ainsi, afin de concevoir des solutions durables pour des véhicules plus sûrs, davantage à l’écoute du conducteur et également de l’environnement, de nombreux facteurs doivent être pris en compte. L’élaboration de nouvelles solutions s’articule de plus en plus autour de grandes thématiques comme l’ergonomie, la sûreté de fonctionnement, la cohabitation entre véhicules hétérogènes (ceux disposant de systèmes d’assistance active et ceux n’en possédant pas)... Il est par conséquent primordial de cerner le milieu dans lequel s’inscrivent des travaux comme ceux menés durant cette thèse.

Ce chapitre a pour objectif la présentation du contexte dans lequel a été défini ce travail. Il permet de comprendre qu’une aide au conducteur ne peut être développée efficacement que lorsque l’ensemble des acteurs intervenant dans la phase de conduite ont été clairement identifiés et/ou modélisés. Par ailleurs, il convient de définir avec précision les interactions entre les éléments du système “conducteur-véhicule-environnement”. Ainsi, l’intégration du DAC dans ce contexte pourra s’effectuer de manière cohérente.

Dans ce chapitre, et par la suite dans l’ensemble du manuscrit, nous utiliserons le terme d’environnement pour ne définir que le cadre “géographique” (la route) dans lequel évolue le véhicule et son conducteur. Une autre approche serait de prendre en compte l’environnement dans sa globalité, avec l’ensemble des acteurs extérieurs qui peuvent influer sur l’activité de conduite, et notamment les

autres usagers. Par conséquent, le système "conducteur-véhicule-environnement" décrit ci-dessous sera traité à un niveau microscopique et non macroscopique.

1.2. Complexité du système

Le véhicule forme, avec son conducteur et l'environnement d'évolution, un système complexe fonctionnant en boucle fermée. De part les informations qu'il perçoit sur l'environnement d'une part, et sur l'état de son véhicule d'autre part, le conducteur determine les consignes (actions de commande) à appliquer au véhicule pour mener à bien la tâche de conduite qu'il s'est fixée. En se basant sur des informations principalement visuelles, mais aussi auditives ou kinésthésiques, le conducteur spécifie des objectifs à atteindre en terme de trajectoire désirée (cf. figure 1.1). Cette étape de perception est fortement dépendante de l'état d'esprit, de l'age ou encore du sexe du conducteur, comme ont pu le montrer un certain nombre de travaux. FONTAINE et GOURLET montrent notamment qu'en corrélant le nombre d'accidents n'impliquant que des véhicules, et cela hors agglomération, avec leur rapport poids/puissance, la gravité des accidents augmente significativement chez les jeunes conducteurs en fonction des performances des véhicules [FON94]. Ceci s'explique plus par une perception erronnée des caractéristiques du véhicule chez les conducteurs inexpérimentés, plutôt que par une réelle volonté de prise de risque.

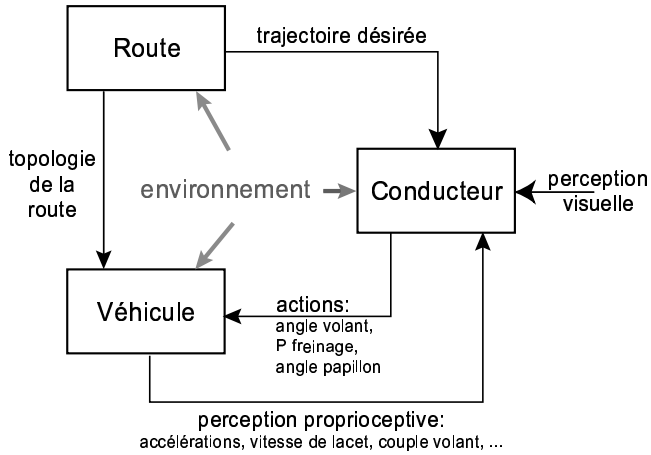


FIG. 1.1. : Le conducteur dans son milieu d'évolution

Dès lors, l'étude d'un unique acteur de cette structure apparait comme complexe compte tenu, d'une part des interactions entre les différents éléments la constituant, et d'autre part de la nécessité de prendre en compte des facteurs difficilement quantifiables. Ces derniers peuvent être liés à l'état d'esprit du conducteur, à ses capacités mentales, physiques ou d'adaptation par exemple. Concernant l'environnement, les conditions météorologiques sont souvent mal évaluées et mal exploitées par le conducteur. Il aura tendance à conduire au-delà des limites de son véhicule pour un contexte donné (pluie, verglas) [GIS97].

Indépendemment des ces événements stochastiques, on distingue deux catégories de grandeurs physiques intervennant lors de la conduite :

- les ***causes*** : entrées que donne le conducteur sur le véhicule. Elles sont au nombre de 3 : l'angle au volant (α_v), la consigne moteur (angle papillon θ_{pap}) traduisant l'appui sur l'accélérateur et la pression de freinage ($P_{freinage}$).
- les ***conséquences*** : sur lesquelles se basera le conducteur pour établir son jugement de la situation dans laquelle il se trouve. Les informations prédominantes à ce niveau sont les accélérations longitudinale et transversale (γ_L, γ_T), la vitesse de lacet ($\dot{\psi}$), la vitesse transversale (V_T) ou encore le couple au volant (C_v), image de l'adhérence du véhicule.

Dès lors, on conçoit aisément que l'intégration efficace d'un DAC ne peut se faire que si ce dernier est en mesure de définir, analyser et interpréter les différentes intéractions et grandeurs sur lesquelles se focalise le

conducteur.

L'importance de l'environnement

Le conducteur est soumis à un ensemble élevé de contraintes pour mener à bien sa tâche de conduite. L'influence de l'environnement peut aisément être mise en exergue en étudiant deux cas de figure totalement distincts en terme de géométrie du profil routier : la conduite sur autoroute et la conduite en montagne. Dans le premier cas, l'activité (physique) de conduite est relativement restreinte. Hors engorgement du trafic ou autres zones de ralentissement, le conducteur maintient une consigne de vitesse quasi-constante, et n'effectue qu'une régulation latérale pour maintenir le véhicule dans la voie, ou pour changer de voie (lors d'un dépassement par exemple). Cette activité restreinte définit la conduite sur autoroute comme monotone et provoque une diminution de la vigilance du conducteur qui peut mener à l'accident. Au contraire, les routes sinueuses de montagne obligent le conducteur à être particulièrement attentif à l'ensemble des indicateurs lui permettant de juger de la criticité de la situation. L'activité de conduite est plus soutenue, les changements de vitesse et phases de freinage fréquents.

1.3. Le véhicule

Bien qu'à l'heure actuelle il existe des modèles reproduisant de manière relativement fidèle le comportement d'un véhicule routier, ce dernier demeure un système complexe dont la modélisation est rendue délicate par la variation de ses paramètres (vitesse, adhérence...). L'intérêt des modèles réside principalement dans leur utilisation lors de la conception de nouveaux véhicules, ou encore dans la compréhension des phénomènes régissant leur comportement. Différentes approches de modélisation sont envisageables et notamment les modèles de connaissance ou de représentation.

Par ailleurs, l'un des organes du véhicule les plus délicats à étudier et modéliser et sans conteste le pneumatique. Celui-ci est l'interface entre la route et le véhicule et a pour rôle de transmettre les efforts. Dans cette section nous décrivons succintement quelques travaux relatifs à sa modélisation. Une description du pneumatique ainsi qu'un état de l'art relativement conséquent peuvent être trouvés dans les travaux de thèse de Sammier [SAM01].

Modèles de connaissance

Ils décrivent le comportement d'un système à partir des lois de la physique le gouvernant. Ces modèles, issus de la phase de modélisation, portent également le nom de *"boîte blanche"*. L'un des modèles de connaissance le plus répandu est sans conteste le modèle "lacet-dérive" (cf. figure 1.2) [RIE40] puisque sa simplicité permet une utilisation embarquée dans des applications temps-réel. Ce modèle à deux degrés de liberté souffre cependant d'un domaine de validité réduit du fait des hypothèses imposées :

- efforts transversaux faibles ($0 < \gamma_T < 4 m/s^2$),
- petits angles sin $\delta \simeq \delta$ et cos $\delta \simeq 1$ (rad),
- rigidités de dérive constantes,
- pas d'effort longitudinal (vitesse constante) ni aérodynamique,
- pas d'effet de roulis ni de tangage,
- centre de gravité au niveau du sol,
- distribution des masses concentrée sur les trains.

De manière à augmenter son domaine de validité, il est possible d'y ajouter un ou plusieurs degrés de liberté tels le roulis ou le tangage. Les modèles les plus complexes peuvent intégrer jusqu'à 30 degrés de liberté [CHA96]. Ces derniers ont pour objectif d'étudier des phénomènes délicats à observer, tels les régimes transitoires du pneumatique.

Modèles de représentation

Issus de la phase d'identification, les modèles "boîte noire" permettent de prédire le comportement d'un processus en fonction de sollicitations spécifiques. Leur domaine de validité est par conséquent restreint mais

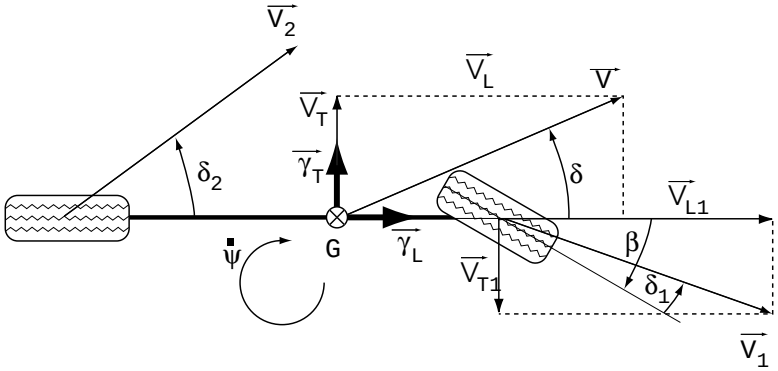


FIG. 1.2. : Modèle "lacet-dérive"

peut être étendu en intégrant un ou plusieurs sous-systèmes dont on possède une connaissance parfaite. Leur intérêt réside dans la possibilité de simuler le comportement d'un véhicule (en cours de conception par exemple) dans des situations de conduite précises (comportement en virage, au freinage...). La littérature est abondante dans ce domaine. GILLESPIE donne une synthèse détaillée des modèles les plus courants [GIL92].

D'autres approches telles les Bond Graph, la modélisation hybride, objet... peuvent également être employées et représentent une part de plus en plus importante des travaux.

Le pneumatique et l'interface roue-sol

Le pneumatique constitue un élément fortement non-linéaire dont le comportement est encore mal connu à ce jour. Pourtant, il représente l'un des protagonistes principaux du comportement dynamique du véhicule puisque la plupart des sollicitations lui sont directement ou indirectement appliquées. La transmission des efforts entre une roue et le sol est un phénomène complexe. Il faut prendre en compte plusieurs critères tels que les déformations élastocinématiques et plastiques, les frottements et glissements, la rugosité des surfaces...

De nombreux auteurs se sont penchés (et se penchent toujours) sur la modélisation du pneumatique. On dénombre à ce stade des approches bien différentes qui peuvent être classifiées suivant trois types : les modèles algébriques, mécaniques et dynamiques. Dans [POR01], un état de l'art de ces modèles a été réalisé. Nous rappellerons simplement les grandes lignes de ces différents modèles.

De type "boîte noire", le modèle de PACEJKA demeure le **modèle algébrique** le plus répandu. Il représente les courbes d'adhérence par des relations trigonométriques dont certains coefficients ont une réalité physique, et sont issus de relevés expérimentaux. Il doit sa large utilisation à sa rapidité de mise en œuvre, conjugée à un besoin de puissance de calcul raisonnable.

Les **modèles mécaniques** consistent à définir le comportement mécanique du pneumatique, afin de déterminer les efforts exercés par celui-ci sur la jante. Pour ce faire, on examine la déformation de la surface de contact pneu-sol en freinage ou en virage. Dès que le pneumatique commence à rouler, il est soumis à des déformations longitudinales et transversales modifiant la forme de la surface de contact. Cette surface est fonction de la section du pneumatique, de la pression de gonflage, de la vitesse ou encore de la charge verticale appliquée. Dès lors, pour comprendre le comportement du pneumatique, il convient d'étudier l'interaction entre la roue et le sol.

Une approche de **modélisation dynamique** a été menée par ZANTEN pour représenter le comportement transitoire du pneumatique. ZANTEN considère la surface de contact roue-sol comme étant une brosse dont chacun des poils décrit une portion élémentaire de la surface. On analyse alors les déformations des poils suivant les situations de conduite étudiées (accélération, freinage...). Ce modèle requiert néanmoins des ressources de calcul importantes.

1.4. Le conducteur

Il devient de plus en plus important de connaître avec précision les traits de caractère de l'élément étant le plus souvent responsable des accidents de la route. Des trois acteurs que l'on retrouve en situation de conduite (cf. figure 1.1), le conducteur est celui qui intervient le plus souvent dans les cas d'accidents, et cela à hauteur de 90% [PRI00]. C'est pourquoi l'étude comportementale du conducteur pose plus globalement le problème de la caractérisation du comportement humain. Celle-ci fait appel à un grand nombre de disciplines (des sciences pour l'ingénieur aux neuro-sciences) et donc à un grand nombre d'approches. Par ailleurs, les objectifs de cette caractérisation diffèrent selon les domaines d'application concernés. Piat *et al.* [PIA02] illustrent à travers plusieurs exemples la difficulté voire l'impossibilité actuelle de mettre en œuvre un modèle unique dont le domaine de validité recouvre une majorité de ces applications. Dans le contexte des DAC, l'étude du conducteur peut aboutir à une individualisation/adaptation des systèmes d'assistance afin que la "meilleure" aide possible soit prodiguée au conducteur, conformément à son profil (physique, psychologique, physiologique...). Il est en effet primordial que, si système d'assistance/surveillance du conducteur il devait y avoir, celui-ci devrait s'adapter ou être adapté au conducteur.

Les différentes études du conducteur dans son milieu d'évolution (réel ou simulé) mènent généralement à deux résultats qui sont, d'une part le développement de modèles comportementaux (cf. §1.4.2), et d'autre part la classification du conducteur (cf. §1.4.3). Dans le premier cas, le but est très souvent d'obtenir un modèle mathématique (sous forme d'une fonction de transfert par exemple) utilisable entre autre pour le développement et la mise au point de véhicules. Dans le deuxième cas, il s'agit, en fonction d'études statistiques le plus souvent, de définir le profil du conducteur (novice, expérimenté...) pour à terme élaborer un modèle cognitif. Cette étude est alors guidée par l'observation des commandes entreprises par le conducteur et de leurs conséquences. Finalement, l'approche consiste toujours à analyser l'activité de conduite sous des angles différents, de manière à en dégager les tâches principales à accomplir et la façon de les traîter.

1.4.1. L'activité de conduite

1.4.1.1. Hiérarchie des tâches de conduite

Durant la conduite, le conducteur accomplit de manière plus ou moins consciente différentes tâches classées suivant 3 niveaux hiérarchiques [KOP94] : **la navigation**, **le guidage** et **la stabilisation** (cf. figure 1.3). En plus de ces tâches "primaires", on distingue les activités annexes, qui tendent à augmenter avec la modernisation des véhicules et l'avènement des systèmes d'information et de communication :

- réglage des systèmes servant au confort : climatisation, sièges, ...
- autoradio, ordinateur de bord, téléphone mobile, système de navigation...

Bien que dans la majorité des cas l'intérêt de ces dispositifs soit de soulager le conducteur en rendant la tâche de conduite plus agréable, on constate bien souvent que son activité s'en trouve augmentée et que l'effet inverse est obtenu...

La tâche de niveau le plus élevé, la **navigation**, concerne la **planification de trajet**, c'est-à-dire le choix d'un itinéraire. Elle est liée à la connaissance que possède le conducteur du parcours et n'est par exemple plus exploitée lors d'un trajet domicile-travail. La fréquence de cette tâche est très faible puisqu'elle n'est entreprise que lors d'un nouveau trajet, contrairement à l'activité de guidage. Le **guidage** consiste à **adapter la conduite aux conditions du trafic** (replanification d'une partie du trajet du fait d'embouteillages...). Finalement, la tâche de fréquence la plus élevée (et de niveau hiérarchique le plus faible) concerne la stabilisation, c'est-à-dire les actions de commande du conducteur.

Durant l'exécution de ces tâches, et plus particulièrement lors du guidage et de la stabilisation, l'on dénombre quatre activités sous-jacentes auxquelles le conducteur fait systématiquement appel :

- la collecte d'informations,
- l'analyse des informations,
- la prise de décisions,
- l'élaboration des actions de commande.

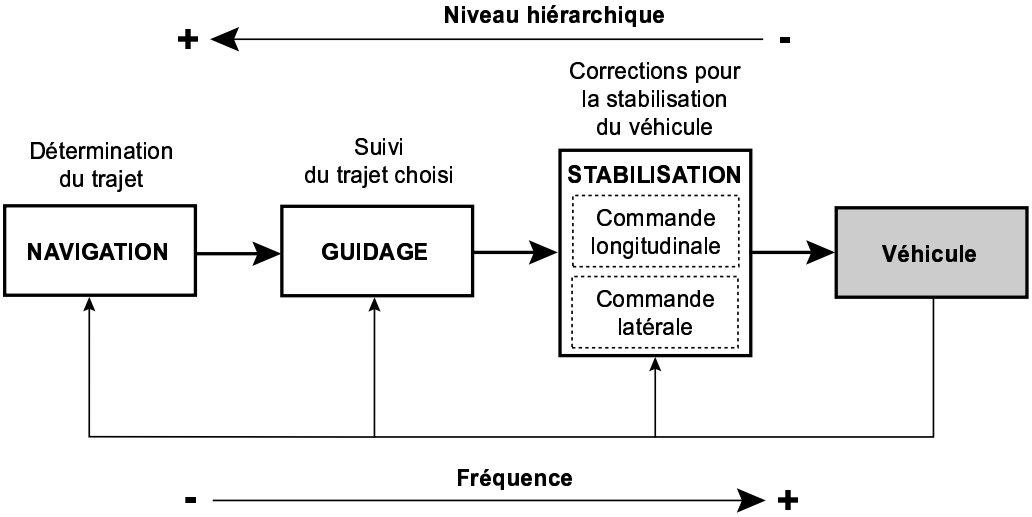


FIG. 1.3. : Hiérarchisation des tâches de conduite

Le bon déroulement de ces différentes tâches est conditionné par un facteur intrinsèque au conducteur qui est sa **motivation/raison** à accomplir le trajet, et le risque qu'il est prêt à prendre pour cela. La motivation est liée à la nature du trajet et peut impliquer un niveau de stress et finalement une prise de risque supplémentaires. LECHNER et PERRIN [LEC93] montrent dans leur étude que le niveau de sollicitations est fortement dépendant de la motivation et que cette dernière serait peut-être même le facteur le plus influant (qui n'a pas appréhendé les heures de bouchon que l'on peut rencontrer lors d'un départ en vacances ?). La prise de risque est conditionnée par la psychologie du conducteur : les jeunes conducteurs, enclins à des sensations fortes, vont prendre davantage de risques.

1.4.1.2. Prise et analyse d'informations

L'activité de perception (recueil d'informations) est primordiale car elle conditionne l'ensemble de la tâche de conduite. On montrera d'ailleurs que ceci se vérifie dans le cadre de la conception d'un DAC. Pour être efficace, ce dernier doit collecter des informations pertinentes, justes, complémentaires voire redondantes afin de définir les actions en adéquation avec la situation réelle (et non avec la situation observée!!). Il n'est par conséquent pas surprenant de constater que les processus d'assistance, ou plus globalement de diagnostic soient élaborés suivant une architecture décrivant les 4 étapes mentionnées précédemment [BRU90]. D'ailleurs, la principale différence constatée entre un conducteur qualifié de novice et un conducteur expérimenté (cf. §1.4.3) se situe dans la prise d'informations qui est plus erronnée et/ou plus incomplète chez le novice.

Lors de la prise et de l'analyse d'informations, le conducteur peut commettre trois types d'erreurs [ROT93] :

- ne pas rassembler suffisamment d'informations,
- collecter des informations contradictoires,
- être submergé par les informations, donc en acquérir trop.

Les informations utiles au conducteur sont celles qui vont le renseigner, d'une part sur l'environnement, et d'autre part sur l'état et le potentiel de son véhicule. Dans ce dernier cas, le conducteur élabore un modèle interne de son véhicule. Il se refère à ce modèle durant l'activité de conduite afin de définir ses actions de commande. Dès lors, de nombreux travaux se sont intéressés à déterminer des critères objectifs reflétant au mieux l'analyse subjective du conducteur. Ces critères sont généralement établis à partir de mesures effectuées sur le véhicule [CHE96, HIS96, ZIN99]. L'ensemble de ces études s'accordent à dire que les éléments principaux sur lesquels se focalise le conducteur représentent à la fois le confort de conduite et les performances mécaniques du véhicule. Ces recherches ont pour objectif final de définir un modèle de conducteur le plus complet possible, souvent structuré autour de niveaux de perception, de décision et finalement de commande [HOR92].

Concernant les informations environnementales, il est unanimement admis que sur l'ensemble des informa-

tions que le conducteur perçoit, environ 90% sont d'ordre visuel [SIV96].

1.4.1.3. Prise de décisions et actions de commande

Outre les erreurs de prise d'informations, il convient de distinguer celles intervenant cette fois au stade décisionnel. SHIFFRIN *et al.* [SHI77], et plus tard RASMUSSEN [RAS83] ont établi un modèle comportemental du conducteur (cf. §1.4.2.3) comportant trois niveaux. Ceux-ci sont relatifs à chaque stade décisionnel. Ces mêmes auteurs ont pu montrer que le conducteur "expérimenté" utiliserait les trois stades alors que le conducteur "inexpérimenté" ne ferait appel qu'aux deux premiers.

Les actions de commande représentent les choix effectués par le conducteur pour mener à bien sa tâche de conduite. Elles doivent donc représenter au mieux les décisions prises. Enfin, elles dépendent des capacités physiques et principalement motrices du conducteur.

1.4.2. Modélisation du conducteur

Il convient ici d'interpréter l'aspect de modélisation sous sa définition automaticienne qui consiste à déterminer une représentation décrivant convenablement le processus observé. La modélisation du conducteur vise à définir des modèles pouvant être employés par exemple lors de la conception de véhicules. L'intérêt réside dans la possibilité de tester les systèmes étudiés selon le comportement du conducteur. Le conducteur est alors considéré comme un organe de commande déterminant les actions nécessaires (angle au volant, pression de freinage...) pour suivre la trajectoire désirée. La figure 1.4 reprend le bloc-diagramme de la boucle de régulation établie sur ce principe. Suivant l'objectif de la validation dans laquelle s'inscrit le modèle conducteur, celui-ci pourra être plus ou moins complet. Dans la majorité des cas, il ne s'attache à répondre qu'à des objectifs restreints et ne possède qu'un domaine de validité limité. On pourra ainsi, dans le cadre d'une étude du comportement transversal d'un véhicule, se limiter à un modèle conducteur représentant uniquement l'aspect transversal du niveau de stabilisation (cf. figure 1.3).

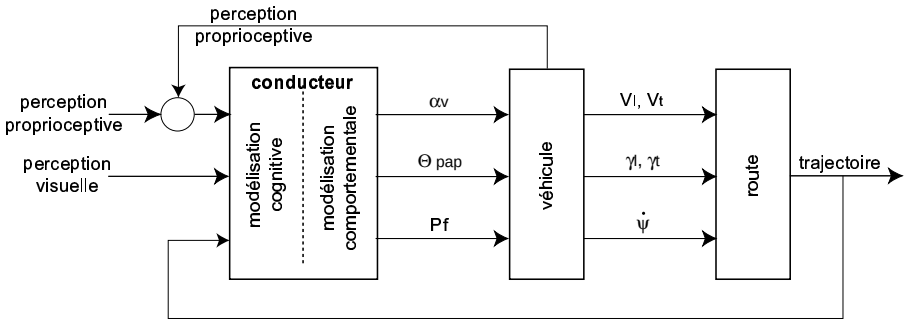


FIG. 1.4. : Le conducteur en tant qu'organe de commande

La modélisation du conducteur nécessite un choix de stratégie de la part de l'automaticien. Ce dernier peut en effet choisir de définir un modèle sensitivo-moteur (modélisation de bas niveau) ou au contraire un modèle décrivant les différents niveaux du comportement conducteur, y compris l'aspect cognitif tel que RASMUSSEN l'introduit (cf. §1.4.2.3). Dans le premier cas, l'objectif est de définir un modèle comportemental représentant uniquement l'aspect de commande du véhicule. Dans le deuxième cas, les travaux considèrent la compréhension et la représentation de la démarche de résolution de problèmes.

1.4.2.1. Démarches de modélisation

Sans le mentionner explicitement, et avant même de définir la stratégie de modélisation, nous venons de faire un premier choix qui est celui d'une modélisation microscopique et non macroscopique du conducteur (cf. figure 1.5). Seul le système "conducteur-véhicule-route" sera considéré.

Une seconde approche de la modélisation du conducteur peut effectivement consister en l'étude des interactions entre plusieurs systèmes "conducteur-véhicule-route". Dans ce cas, le conducteur est replacé dans le contexte général/macroscopique où la tâche de conduite est adaptée aux autres usagers de la route. Suite à ce

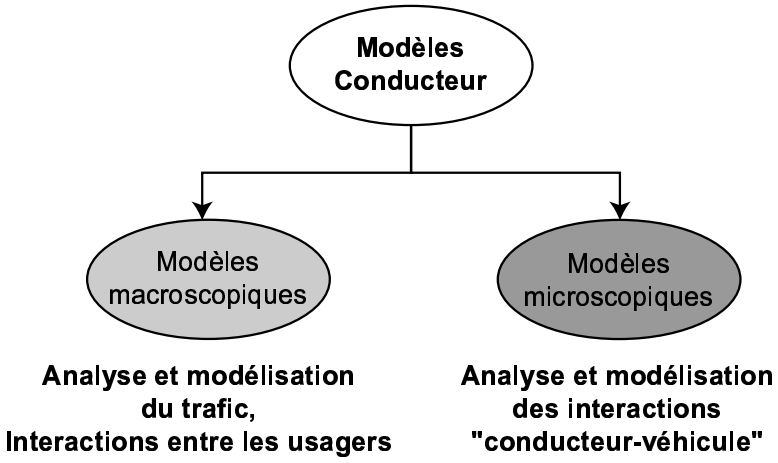


FIG. 1.5. : Structures de modèles conducteur

choix, l'automaticien dispose de tous les outils généralement utilisés pour modéliser un processus : il peut ainsi définir un modèle continu, discret, linéaire, non linéaire, basé sur les théories heuristiques...

Modèles macroscopiques

L'emploi de ces modèles se retrouve dans la simulation et l'analyse du trafic routier comme par exemple la modélisation des scènes de congestion du trafic ou l'asservissement d'une flotte de véhicules dans une même voie [LEU88]. Ces modèles n'ont qu'un intérêt limité dans l'étude des scènes de conduite où le trafic est faible puisque le conducteur est alors livré à lui-même et peut définir les sollicitations appropriées sans subir l'influence de la densité de circulation.

Modèles microscopiques

Dans ces modèles sont représentées les particularités du système "conducteur-véhicule-route", voire "conducteur-véhicule" puisqu'il arrive que l'automaticien se découple de l'environnement dans sa modélisation. Les modèles conducteurs ainsi définis visent à observer le processus d'un point de vue microscopique dans le but d'améliorer la sécurité de conduite et le comportement du véhicule par :

- l'adaptation de la dynamique du véhicule à l'automobiliste,
- le développement de systèmes d'assistance, d'aide à la conduite (ABS, ESP, régulateur de vitesse...).

Les domaines de validité de ces modèles sont souvent restreints à une situation de conduite précise lors de laquelle le conducteur est représenté comme un organe de commande. Des modèles pour la conduite en ligne droite, en virage ou pour l'évitement d'obstacles ont ainsi été mis en œuvre.

1.4.2.2. Modèles comportementaux

Dans ce domaine, la littérature est conséquente. De nombreuses approches de modélisation ont été employées. On peut néanmoins les classifier suivants trois catégories :

- les modèles continus : PID (Proportionnel Intégral Dérivée) et plus globalement les modèles GPC ("*Generalized Predictive Control*"),
- les modèles discrets basés sur une représentation séquentielle du comportement du conducteur,
- les modèles hybrides intégrant une description à la fois continue et discrète du conducteur.

Modèles continus

Les modèles continus ont fait l'objet du plus grand nombre de recherches. Ils sont par conséquent les plus répandus dans la littérature et représentent la dynamique longitudinale, transversale ou le couplage des deux. Ils peuvent être linéaires [KRA86], non linéaires ou encore basés sur la théorie des ensembles flous [KRA82] pour modéliser la prise de risque du conducteur (et donc intégrer un aspect cognitif).

Les premiers modèles de ce type développés dans les années 60 étaient purement correctifs et n'intégraient pas d'information sur le parcours à venir. Or l'anticipation et la prise en compte de "*preview information*" caractérisent justement le comportement du conducteur. Très vite sont donc apparus des modèles prédictifs (GPC) basés sur le fait que le conducteur échantillonne à intervalle de temps régulier sa position, l'orientation de son véhicule ainsi que le profil routier qu'il aborde. Le modèle le plus reconnu représentant le fonctionnement du conducteur lors du guidage d'un véhicule est sans contexte celui à deux niveaux proposés par Donges [DON78]. La prise en compte de l'anticipation du conducteur est représentée par une structure de commande de type "*feedforward*" utilisant l'information de courbure de la trajectoire à suivre ("*Anticipatory open-loop control*" sur la figure 1.6). L'activité de stabilisation ("*Compensatory closed-loop control*") permet d'établir les corrections nécessaires selon la position du véhicule, l'écart latéral par rapport à la trajectoire désirée et l'erreur d'orientation du véhicule.

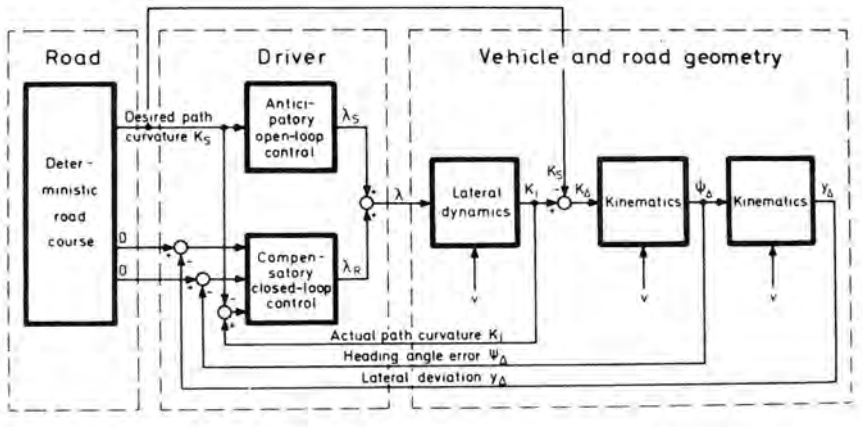


Fig. 1.6. : Le modèle conducteur à deux niveaux selon [DON78]

Limité exclusivement à la prise en compte des informations visuelles du conducteur (position du véhicule, trajet à suivre...), le modèle à deux niveaux a été adapté afin de distinguer les corrections visuelles et proprioceptives (cf. figure 1.7) [AFO93].

Pour finir, on citera un modèle développé non pas pour des besoins de simulation du comportement conducteur mais pour la conception d'un véhicule à conduite automatique. Fondé sur la théorie de la commande robuste, le modèle de commande latérale de Mueller *et al.* a été développé pour tenir compte des variations de certains paramètres lors de la conduite (vitesse, contact roue-sol...) [MUL96]. Une des particularités de ce modèle est de tenir compte uniquement du déplacement latéral pour définir les corrections de braquage nécessaires. L'information d'anticipation du conducteur est représentée par la prise en compte de la courbure de la route à venir.

Modèles discrets

Les premiers modèles discrets ont été développés au début des années 60 dans le but de représenter l'activité de suivi d'un véhicule (régulation de vitesse en fonction d'un véhicule cible). Ils intègraient un paramètre temporel relatif au temps de réaction du conducteur, ou au caractère prévisionnel de certaines de ses actions.

La justification de l'emploi de modèles discrets réside dans le fait que, d'après certains auteurs, le conducteur se comporte comme un systême de surveillance : lorsque un indicateur de son choix dépasse un seuil qu'il s'est fixé, une action est entreprise. Ainsi, des indicateurs tel le TLC ("Time to Line Crossing") ou encore le TTC ("Time To Collision") furent introduits pour modéliser le conducteur dans des tâches de maintien du véhicule

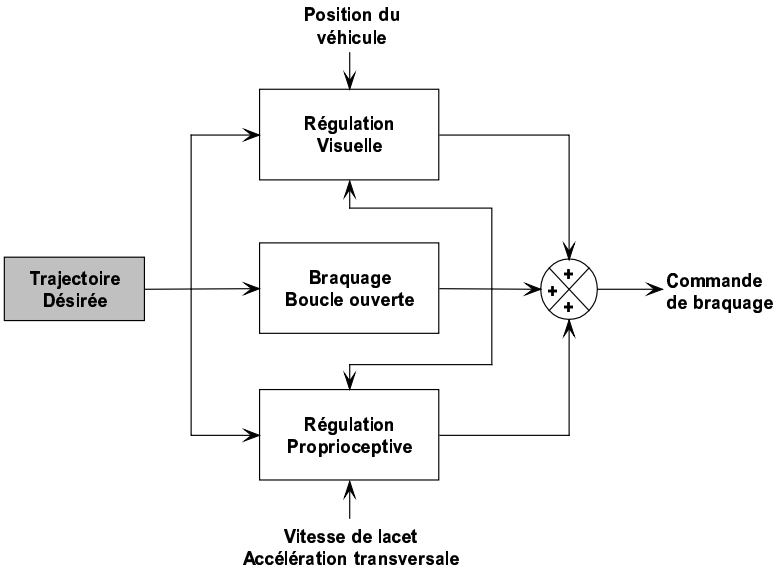


FIG. 1.7. : Modèle conducteur de AFONSO *et al.* [AFO93]

dans la voie ou encore de gestion d'inter-distances entre véhicules [GOD84, FAR86]. Dans le chapitre 4, nous verrons, dans le cadre de la prise de virage, une application du TTC pour la modélisation de la phase de freinage.

Modèles hybrides

Les modèles hybrides conjugent les deux méthodes de modélisation présentées ci-dessus. Leur but est de représenter de manière réaliste le comportement du conducteur, y compris la charge mentale et l'aspect cognitif de résolution des problèmes. Pour synthétiser, ils reproduisent à la fois les niveaux de perception, d'analyse et décision et finalement d'exécution (actions de commande) du comportement humain. Dans cette optique, on citera notamment les travaux de MAJJAD *et al.* concernant un modèle hybride capable de reproduire le comportement de différents types de conducteurs [MAJ98]. Dans ce modèle, les évènements perçus sont gérés séquentiellement en fonction de leurs priorités. Les dynamiques longitudinale et latérale ont fait l'objet de l'utilisation d'un régulateur de type GPC.

Citons également le modèle conducteur "*IPG-Driver*" dont l'objectif est de fournir une trajectoire et un profil de vitesse pour un parcours donné afin d'étudier le comportement dynamique d'un véhicule en simulation [RIE90].

1.4.2.3. Modèles cognitifs

La plupart des modèles cognitifs poursuivent le même objectif qui est la compréhension et la représentation de la démarche de résolution de problème, de l'analyse de la situation jusqu'à la prise de décisions. Durant l'activité de conduite, la structure conducteur-véhicule peut être assimilée à une architecture de collaboration homme-machine, où le conducteur est considéré comme un opérateur. Cette analogie a notamment permis de définir un modèle comportemental hiérarchisé du conducteur calqué sur celui de l'opérateur, et plus globalement sur celui du comportement humain. Ce modèle (cf. figure 1.8) initié par RASMUSSEN [RAS83], dispose de trois niveaux raccordant la phase de prise d'informations aux actions de commande suivant trois mécanismes décisionnels qui ont été identifiés :

- le comportement fondé sur l'entraînement/**niveau tactique** ("**Skill-based behaviour**") : l'opérateur effectue des actions à partir d'un apprentissage fonction de la pratique. Ces actions, dont l'exécution se fait de manière totalement inconsciente, s'apparentent à des réflexes acquis avec l'expérience,
- le comportement procédural/**niveau opérationnel** ("**Rule-based behaviour**") : face à une situation déjà rencontrée par le passé, l'opérateur peut réagir suivant des règles pré-établies. Les signes sur lesquels

il se base sont sélectionnés parmi les informations percues à l'étape de "prise en compte". Des règles du type "SI - ALORS" déterminent le comportement à avoir face à la situation à laquelle l'opérateur est confronté. Un outil de modélisation particulièrement adapté à ce niveau est sans conteste la logique floue qui reprend la représentation sous forme de règles,

– le comportement fondé sur la connaissance/**niveau stratégique** ("**Knowledge-based behaviour**") : intervient lors d'une situation nouvelle ou aucun apprentissage ni aucun système de règles ne peut amener l'opérateur à la solution. Il adapte alors ces raisonnements et tente de prédire l'évolution du système par rapport à des actions qu'il aura effectuées.

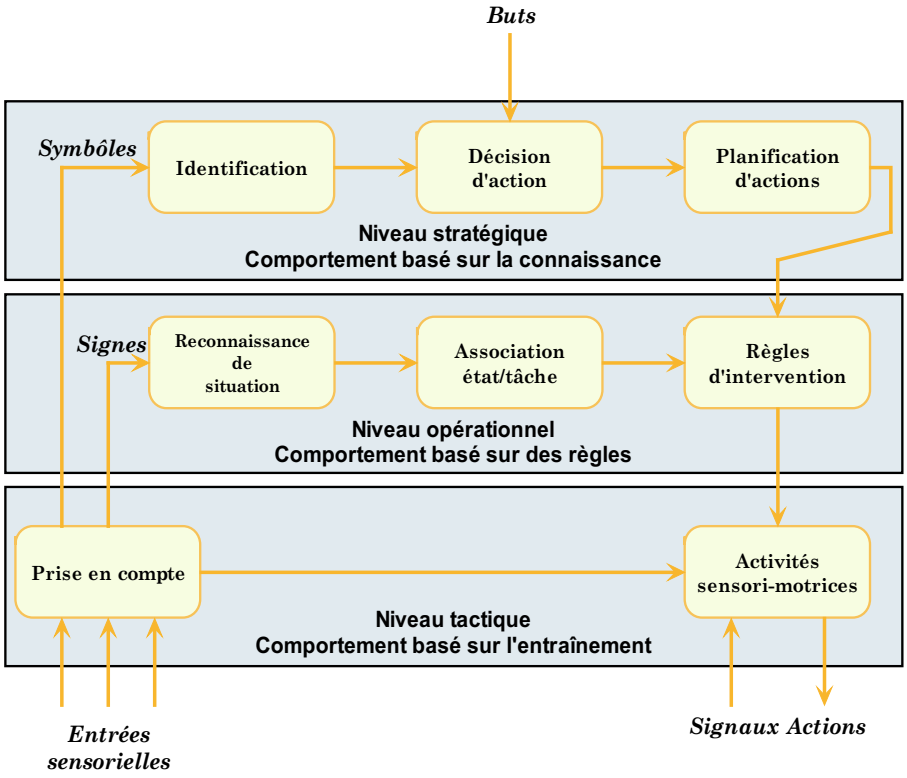


FIG. 1.8. : Modèle cognitif selon [RAS83]

Les trois niveaux ainsi définis sont caractérisés par des fréquences d'exécution différentes : alors que les activités basées sur la connaissance ont un déroulement relativement long dans le temps et une flexibilité importante, celles fondées sur l'apprentissage s'exécutent instantanément. La structure illustrée figure 1.8 représente le comportement humain dans sa globalité et s'applique plus particulièrement à l'activité de conduite telle qu'elle a été présentée au paragraphe 1.4.1.1.

Les frontières, si tant est qu'elles existent, entre les différents niveaux dépendent cependant du conducteur et notamment de son expérience. Pour certains conducteurs, la phase de stabilisation se basera à la fois sur des règles pré-établies et sur l'apprentissage qu'ils auront eu de la conduite. Ainsi ils feront intervenir les différents niveaux pour parvenir à réaliser une seule et même tâche [NAT97].

Le principal intérêt de l'étude cognitive est bien sûr de comprendre la manière avec laquelle le conducteur établit son jugement pour définir les actions nécessaires au bon déroulement de la tâche de conduite. Une modélisation adéquate dans ce domaine laisse alors présager une individualisation des systèmes d'aide afin que ces derniers répondent aux besoins spécifiques d'un conducteur donné. Ces systèmes devront donc intégrer un des aspects comportementaux les plus importants qui est la faculté d'anticipation. Celle-ci permet au conducteur de rapidement détecter et interpréter les manœuvres d'autres véhicules et d'adapter sa conduite. Par conséquent, l'utilisation de modèles de simulation tel COSMODRIVE (COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr) [MAY02], ou l'étude et la modélisation de l'anticipation [DAG02], d'une part facilitent la détermination du

niveau d'interaction entre les DAC et le conducteur, et d'autre part accroîssent l'efficacité de l'aide prodiguée.

1.4.3. Classification du conducteur

La complexité du problème qui mène à l'impossibilité de caractériser le conducteur dans sa globalité est mise en évidence lors de l'étude de l'activité de conduite. Des facteurs très variés tels l'état physique, psychique ou la charge de travail entrent en ligne de compte et peuvent influer sur le comportement du conducteur. Dès lors, même s'il est probablement impossible de tous les répertorier et surtout d'en définir les impacts sur le conducteur, un certain nombre de ces critères sont couramment employés pour définir des classes de conducteurs. Des modèles cognitifs appropriés à chacune de ces classes sont souvent développés. La caractérisation du conducteur peut être obtenue en étudiant des informations relatives à sa personnalité (sexe, âge...), en se basant sur ses actions et leurs conséquences (signaux mesurés sur le véhicule) ou encore en effectuant des relevés de signaux physiologiques qui nécessitent souvent d'équiper le conducteur. La méthode de classification choisie dépendra principalement de l'objectif attendu de l'étude : si celle-ci a par exemple pour but de mettre en relation la gravité des accidents avec l'âge du conducteur, une étude accidentologique basée sur différentes classes d'âges sera menée.

1.4.3.1. Classification selon l'état civil

Pourquoi les compagnies d'assurance pratiquent-elles une telle discrimination envers les jeunes conducteurs et plus particulièrement les hommes ? Certainement s'inspirent-elles des différentes études sur les risques d'accident en fonction de l'âge qui montrent que pour une même distance, le risque est particulièrement élevé chez les jeunes, surtout s'ils sont du sexe masculin [FON94], [EVA91]. Le facteur "risque d'accident" est en effet maximum dans la tranche d'âge 18-25 ans, qui est principalement représentée par des conducteurs qualifiés d'occasionnels. Par ailleurs, ceux-ci sont, la plupart du temps, impliqués dans des accidents dont l'origine est une perte de contrôle du véhicule et qui n'impliquent aucun autre usager de la route. Le facteur occasionnel, reflétant un manque d'expérience, pourrait ainsi expliquer une partie des accidents constatés dans cette classe d'âge, mais très souvent il s'agit d'une prise de risque plus importante ou mal évaluée. Parallèlement à cela, ces études concluent également à une recrudescence des accidents pour les personnes de plus de 60 ans, pour la plupart des accidents d'intersection dont les origines sont en général une baisse de la perception et des capacités physiques.

1.4.3.2. Classification selon l'expérience, les caractéristiques physiques et psychologiques

L'expérience, les caractéristiques physiques et psychologiques sont bien sûr liées à l'âge et au sexe du conducteur. Elles font, tout comme l'âge et le sexe, parties des facteurs à long terme qui interviennent dans l'activité de conduite puisqu'elles ne dépendent pas du trajet. Les caractéristiques physiques qui entrent en compte dans la phase de conduite sont principalement les capacités motrices du conducteur qui traduisent le potentiel dont pourra disposer ce dernier avec l'expérience et la pratique.

Dans les études relatives au conducteur, le niveau d'expérience est très souvent évalué en fonction de la pratique de la conduite. On caractérise l'automobiliste par rapport à l'âge de son permis et au nombre de kilomètres parcourus. Ainsi, ROTHENGATTER *et al.* [ROT93] ont défini une classification qui est très largement utilisée dans les études statistiques du comportement du conducteur (cf. tableau 1.1).

Catégories de conducteurs	**Nombre d'années du permis et pratique**
Novice inexpérimenté	Permis < 1 an, Pratique < 1000km
Novice expérimenté	Permis < 1 an, Pratique > 1000km
Conducteur inexpérimenté	1 an < Permis < 5 ans, Pratique < 10000km / 5 dernières années ou Permis > 5 ans, Pratique < 10000km/dernière année
Conducteur expérimenté	Permis < 5 ans, Pratique < 100000km/5 dernières années ou Permis > 5 ans, 10000km / dernière année < Pratique < 100000km / 5 dernières années
Conducteur très expérimenté	Permis > 5 ans, Pratique > 100000 km / 5 dernières années

TAB. 1.1.: Caractérisation selon [ROT93]

1.4.3.3. Classification selon des mesures proprioceptives

A ce niveau, il convient de distinguer les techniques qui consistent à observer directement le conducteur de celles qui effectuent une observation de son activité de conduite. Dans le premier cas, on étudiera des signaux physiologiques du conducteur, ce qui nécessite de l'équiper d'un certain nombre de capteurs. Dans le deuxième cas, on s'attachera à analyser des signaux issus du véhicule, images de l'activité du conducteur. L'étude physiologique s'attache en fait à déterminer des changements comportementaux lors de la phase de conduite. Elle est généralement purement relative, se base sur un état physiologique de départ ou de référence et analyse l'évolution par rapport à cet état initial.

Informations physiologiques

Contrairement à l'expérience ou l'état civil du conducteur (cf. §1.4.3.2 et §1.4.3.1), les conditions physiologiques sont des facteurs à court terme qui interviennent sur l'activité de conduite et évoluent durant le trajet. L'état physiologique du conducteur a une influence primordiale sur les performances de conduite et représente la cause principale d'accidents. Les facteurs de dégradation de l'état physiologique menant à l'hypovigilance sont la fatigue, la consommation d'alcool, la prise de drogues etc...

Certains travaux, notamment ceux de Vallet et Khardi [VAL95], sont fondés sur une instrumentation du conducteur (analyse des activités cérébrales et oculaires) et détectent de façon efficace les situations d'hypovigilance. L'instrumentation du conducteur n'est évidemment pas envisageable dans un système embarqué de série dont le but serait par exemple de prévenir le conducteur d'une diminution de son niveau de vigilance. Un projet européen du nom de AWAKE ("*Assessment of driver vigilance and Warning According to traffic risK Estimation*") a été lancé en septembre 2001 afin de développer un module de diagnostic de la vigilance du conducteur [BEK02]. Ces travaux se caractérisent par l'absence d'instrumentation de ce dernier. Les acteurs de ce projet sont entre autres, Siemens VDO, NavTech et le CNRS.

Informations kinesthésiques

Ces informations sont perçues par le conducteur par l'intermédiaire de l'oreille interne, en ce qui concerne les mouvements angulaires et les accélérations, et par l'intermédiaire du sens musculaire sensible aux vibrations, forces et couples. Le principal avantage de l'observation de ces signaux réside dans la relative facilité à les mesurer puisqu'il existe un grand nombre de capteurs dont certains font leur apparition en série dans les véhicules. Ces signaux permettent en outre d'analyser la manière dont le conducteur utilise les capacités de son véhicule. Une illustration de ces propos réside dans l'étude des sollicitations longitudinale et transversale par l'intermédiaire des accélérations. Le graphique qui lie les accélérations longitudinale γ_L et transversale γ_T porte le nom de diagramme G-G [MIL95] et permet de voir si le conducteur applique à son véhicule des sollicitations couplées (le freinage en virage présenté sur la figure 1.9a) ou dissociées (démarrage en ligne droite présenté sur la figure 1.9b) sur le volant et les pédales. Par abus de langage, certains auteurs nomment cette représentation "cercle d'adhérence" [LEC93]. Les accélérations sont les images de l'adhérence du véhicule dans les deux directions et une approximation du potentiel maximum d'adhérence consiste à le représenter par un cercle.

Lechner et Perrin [LEC92, LEC93] ont ainsi mis en évidence :

1. la similitude des sollicitations longitudinales en accélération et en freinage, bien que le potentiel de freinage d'un véhicule soit largement supérieur à son potentiel d'accélération,
2. que les niveaux d'accélération (longitudinale γ_L et transversale γ_T) acceptés par les conducteurs diminuent avec l'augmentation de la vitesse,
3. qu'en situation de conduite traditionnelle (sur route), le conducteur ne dépasse que très rarement le tiers des capacités maximales du véhicule,
4. que les accélérations transversales permettent davantage de caractériser le conducteur que les accélérations longitudinales.

C'est également dans ce contexte que Dang [DAN00] a développé un outil de diagnostic du comportement de l'automobiliste visant à détecter des indicateurs d'une conduite à risque. Cet outil a l'avantage de ne nécessiter aucune instrumentation du conducteur, susceptible de provoquer une gêne quelconque, et ne se base que sur une instrumentation du véhicule. L'utilisation sur des acquisitions provenant d'une campagne d'essais réunissant

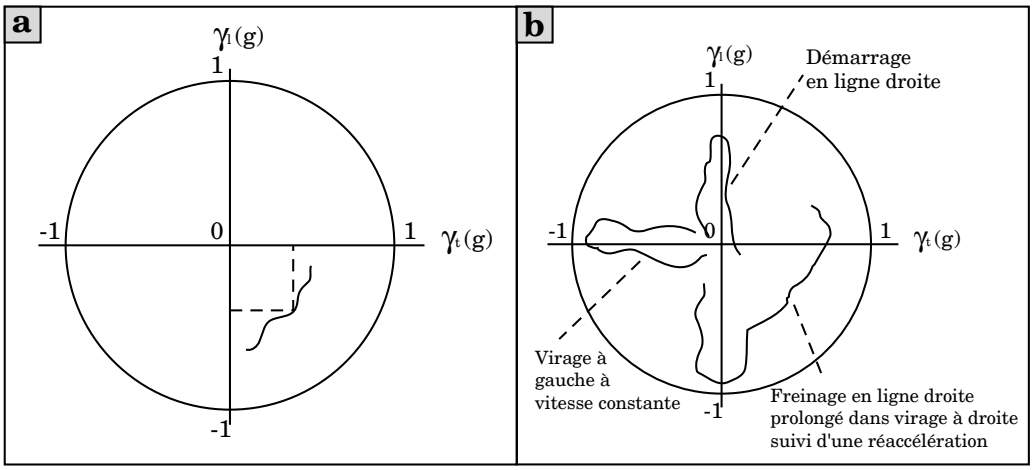


FIG. 1.9. : Exemple d'un diagramme G-G

plusieurs conducteurs a permis d'effectuer une classification de ces derniers. Néanmoins, la détection du changement du comportement, témoin de l'imminence d'une situation dangereuse, n'a pas pu être mise en œuvre durant ces travaux.

Informations visuelles

Lors de la phase de perception, la vision représente la majeure partie des sources d'informations sur lesquelles se focalise le conducteur pour définir sa stratégie de prise de trajectoire. L'étude des zones d'attention, des durées de fixation d'un point, de la fréquence des mouvements occulaires sont autant d'indicateurs utilisés dans la littérature pour améliorer la compréhension de la perception visuelle. Ainsi, un bon nombre de travaux a concerné l'analyse des informations visuelles [REI81, KON68, LEA73] dans le but de qualifier et quantifier ces indicateurs dans des phases de conduite spécifiques, réelles ou simulées (prise de virage, évitement d'obstacles...). L'ensemble de ces expérimentations a cependant nécessité une instrumentation conséquente du conducteur (port d'un casque équipé d'une caméra 8 mm, casque pour bloquer les mouvements de la tête...). Cette instrumentation influe inévitablement sur son comportement. Certains auteurs ont mis en évidence des différences entre des conducteurs "expérimentés" et "inexpérimentés", tant au niveau du point de fixation du regard que dans la durée de fixation. Selon KUIKEN *et al.* [KUI91] :

- un conducteur "inexpérimenté" fixe plus longuement (environ deux fois plus longtemps) un point donné qu'un conducteur expérimenté,
- un conducteur "expérimenté" porterait son regard plus loin qu'un conducteur "inexpérimenté",
- les points de fixation du regard d'un conducteur "expérimenté" sont peu nombreux, précis et correspondent aux points objectifs qu'il se fixe d'atteindre durant la phase de conduite.

Du fait des nombreuses restrictions imposées lors de ces essais, les auteurs mentionnent que leurs conclusions nécessiteraient d'être complétées et validées dans des conditions de conduite plus adaptées (de manière à contraindre le conducteur le moins possible). Récemment, ces premiers résultats ont été confirmés par BAUJON *et al.* [BAU00] à l'aide de l'outil d'analyse et d'étude temps-réel du conducteur BASIL (*"Behavior Analysis StudIes Low-cost system*"). Pour l'heure, ce procédé nécessite encore une instrumentation du conducteur sous la forme d'une paire de lunettes equipées de deux caméras.

Autres types d'informations

Bien d'autres informations proprioceptives peuvent être utilisées pour caractériser le conducteur. Un exemple est le rythme cardiaque qui est une image du niveau de stress du conducteur. Certaines manifestations comportementales sont également en mesure de renseigner sur l'état de fatigue ou de nervosité. Ainsi, le fait de se ronger les ongles, d'augmenter les mouvements autistiques (mouvements des mains vers son propre corps)

traduisent la monotonie d'une tâche et la diminution d'attention du conducteur. Cependant, la complexité de ces observations nécessite pour l'heure de faire appel à des experts pour leur analyse, ce qui exclu totalement la mise en œuvre temps-réel embarquée.

1.4.3.4. Classification selon des mesures extéroceptives

Pour une grande majorité des conducteurs, la sécurité, couplée au confort de conduite, est le facteur qui prime et guide leur choix dans l'activité de conduite. Fort heureusement, les conducteurs qui basent leur style de conduite sur la recherche de performances ou de sensations fortes restent peu nombreux. Cependant, comment et surtout à partir de quelles grandeurs mesurables et quantifiables peut-on définir le confort ? Dans ce contexte, l'automaticien se heurte une fois de plus à la difficulté de rapprocher des données objectives à une analyse purement subjective effectuée par le conducteur. Pourtant, certains auteurs affirment que l'évaluation faite par le conducteur du niveau de confort est liée aux niveaux d'accélérations linéaires et angulaires atteint par le véhicule le long du parcours, ce qui peut aisément être illustré par un exemple. Lors d'une prise de virage, le véhicule (et donc le conducteur) est soumis à la force centrifuge dûe à l'accélération transversale. Celle-ci a pour conséquence d'entraîner le véhicule vers l'extérieur du virage et de "plaquer" son conducteur dans le siège, dans cette même direction. On conçoit donc aisément que plus cette accélération et ces variations seront faibles, plus la position de conduite sera convenable. Le conducteur va donc définir une trajectoire lui permettant de limiter ces sollicitations au mieux. Ce choix sera fonction de son profil car comme toute notion subjective, les niveaux de confort sont propres à chacun... A terme, ce phénomène se traduit par une trajectoire différente et propre à chaque conducteur.

Partant de ce constat, nous montrons dans le chapitre 3 que l'étude de la trajectoire en courbe peut mener à terme à la caractérisation du conducteur. Néanmoins, dans le cadre de ces travaux (et plus particulièrement de la commande latérale du véhicule), nous utilisons les particularités des trajectoires de deux types de conducteurs afin d'élaborer un modèle correspondant à leur profil respectif. Cette approche consiste à modéliser la tâche de guidage[1] telle qu'elle a été définie dans le paragraphe 1.4.1.1.

1.5. Conclusion

L'assistance au conducteur nécessite de connaître le conducteur bien sûr mais également l'ensemble des éléments qui ont ou peuvent avoir une influence sur celui-ci. Traditionnellement, on étudie le conducteur dans son milieu d'évolution tel qu'il a été décrit dans ce chapitre. On s'intéresse particulièrement aux interactions entre le conducteur, son véhicule et l'environnement dans lequel il se situe. Il convient cependant de clairement définir ce que l'on entend par environnement. La description effectuée dans ce manuscrit considère uniquement l'environnement géographique et ne tient pas compte de l'ensemble des sollicitations provenant des autres usagers de la route.

Ce chapitre décrit dans un premier temps la complexité du système "conducteur-véhicule-environnement" et présente succintement quelques notions relatives à la modélisation du véhicule. Il aborde également l'un des éléments majeurs de la dynamique véhicule et certainement le plus délicat à modéliser : le pneumatique.

Dans la suite de ce manuscrit, le lecteur remarquera que l'approche de ces travaux est principalement fondée sur une étude du comportement du conducteur. Notre objectif réside dans la volonté de fournir une assistance longitudinale et/ou latérale correspondant au profil de conduite de l'automobiliste. C'est pourquoi une grande partie de ce chapitre a été consacrée aux travaux d'étude comportementale du conducteur ainsi qu'à l'analyse de l'activité de conduite. Suivant l'application recherchée, l'étude du conducteur peut mener par exemple à l'obtention d'un modèle de commande (utilisé pour le développement de véhicules) ou à sa classification selon différents critères (état civil, mesures proprioceptives, ...). Dans le contexte de l'assistance à la conduite présentée dans le chapitre 2, l'objectif est à terme de pouvoir individualiser l'assistance au conducteur.

[1] Lors de la modélisation, la phase de stabilisation est implicitement prise en compte. Le modèle est en effet déterminé en fonction d'une trajectoire réelle, conséquence directe des phases de navigation, guidage et stabilisation. Néanmoins, le modèle ainsi défini permet de générer des trajectoires que le conducteur pourra suivre (et représentant donc uniquement le niveau de guidage).

Chapitre 2

Vers une assistance au conducteur

"Le champignon le plus vénéneux, c'est celui que l'on trouve dans les voitures."

Coluche

Sommaire

2.1. Introduction 23
2.2. Assistance, conduite automatisée et route intelligente : état de l'art 24
2.2.1. La conduite automatisée 24
2.2.2. La route intelligente 25
2.2.3. L'assistance à la conduite 26
2.2.4. L'assistance au conducteur dans le système "conducteur-véhicule-environnement" . . . 27
2.2.5. L'insécurité liée à l'assistance 29
2.2.6. De nombreux projets d'assistance 30
2.3. Le projet "*Navigation Aided Intelligent Cruise Control*" 31
2.3.1. Objectifs généraux 31
2.3.2. Phases d'évolution du projet 32
2.3.3. Stratégie 33
2.3.4. Structure du système d'aide à la conduite 34
2.3.5. Couplage des assistances longitudinale et latérale 36
2.3.6. Objectif global de la thèse 37
2.4. Conclusion 37

2.1. Introduction

Alors que la sécurité passive (protection des occupants en cas d'accident) a fait énormément de progrès ces dernières années, les constructeurs et autres équipes de recherches optent en parallèle pour la sécurité active. L'objectif est, dans ce dernier cas, d'éviter l'accident.

Quelle(s) stratégie(s) peut/doit-on alors privilégier lorsque la plupart des études montrent que le conducteur est la principale cause d'accidents ? Faut-il soulager le conducteur en le déchargeant des tâches fastidieuses ou répétitives pouvant à présent être réalisées par des systèmes électroniques d'assistance ? On promouvoit alors **l'assistance au conducteur**. Ou faut-il purement et simplement supprimer ce dernier au profit de **véhicules entièrement automatisés et autonomes** ? Enfin, ne devrait-on pas lui fournir les informations lui permettant de faciliter sa tâche de conduite en lui signalant par exemple la densité de circulation sur l'itinéraire envisagé ? La **route intelligente** dont il s'agit dans ce dernier point consiste à intégrer le véhicule dans un environnement où la communication avec l'infrastructure est omniprésente.

Il est indéniable que les résultats les plus probants seraient ceux issus d'un changement radical du comportement et d'une prise de conscience du conducteur. Il semble tout aussi indéniable que cette tâche soit la plus délicate à réaliser... Pourtant, à l'écouter, l'automobiliste français est un modèle du genre, respectant scrupuleusement le code de la route, il est courtois et patient... attendant à échéance quasi-fixe une probable amnistie des quelques erreurs qu'il aurait pu commettre !

Ce chapitre a pour objectif de décrire le contexte des différentes voies de recherche que sont l'assistance à la conduite, la conduite automatisée et finalement la route intelligente. La connaissance de ce contexte permet de comprendre l'intérêt des travaux initiés dans cette thèse et relatifs à la mise en œuvre d'un système intelligent d'assistance au conducteur. Le projet NAICC fait l'objet d'une description détaillée dans la deuxième partie de ce chapitre.

2.2. Assistance, conduite automatisée et route intelligente : état de l'art

Dans ce contexte, la notion de système d'assistance fait référence aux dispositifs fournissant une aide au conducteur en le soulageant de l'une ou l'autre activité. La conduite automatisée concerne les solutions ne nécessitant plus de conducteur, la conduite étant intégralement prise en charge par un système autonome. Enfin, la route intelligente représente les dispositifs d'intercommunication où le conducteur reçoit des informations provenant d'une infrastructure extérieure au véhicule.

Il ne s'agit pas de choisir l'une ou l'autre des approches mais de montrer leur intérêt propre et surtout l'aspect bénéfique pour le conducteur de leur **complémentarité**. Les équipements concernés par l'ensemble de ces dispositifs sont souvent identiques. Les aides à la conduite peuvent (devraient ?) être considérées comme des étapes intermédiaires à l'automatisation de la conduite et pourraient être utilisées en dehors des sites spécifiques à la conduite automatique. Le développement de telles applications se trouve facilité par plusieurs facteurs socio-économico-politiques répertoriés par SHLADOVER [SHL98] et synthétisés ci-dessous :

- l'intérêt porté par des utilisateurs potentiels : personnes âgées dont le désir de mobilité reste important, volonté de perdre le moins de temps possible dans les transports, le fait d'accepter de payer les progrès techniques liés à la sécurité automobile...
- l'intérêt porté par les équipementiers : augmentation du nombre de capteurs et dispositifs électroniques sur les véhicules modernes, l'augmentation du rapport performance/prix de ces dispositifs...
- l'intérêt porté par les services publics et les administrations (ministère du transport...) : optimisation de l'utilisation des routes (autoroutes) réduisant les besoins de construction, régulation du trafic, effet bénéfique sur l'environnement...

Les paragraphes suivants s'attachent à décrire brièvement les grandes lignes de l'automatisation de la conduite, de la route intelligente et de l'assistance au conducteur en illustrant ces propos par quelques projets passés et/ou en cours d'élaboration. Le sujet des travaux présentés dans ce mémoire ayant attrait à la mise en œuvre d'un DAC, le lecteur comprendra que ce dernier point sera plus largement évoqué et qu'une description des différentes assistances envisageables sera abordée. Pourtant, ce tour d'horizon ne pourra être considéré comme exhaustif devant le nombre de projets et de recherches effectués dans un domaine en pleine mutation économique et technologique.

2.2.1. La conduite automatisée

Bon nombre de projets d'automatisation de la conduite ont débuté en Europe avec le programme PROMETHEUS ("*PROgraM for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Security*") ou aux Etats-Unis, avec le programme PATH ("*Program on Advanced Technology for the Highway*") au milieu des années 80. Indépendants mais en même temps très proches, ces deux programmes visaient des objectifs similaires. Ceux-ci consistaient à l'augmentation de l'efficacité et de la sécurité des transports sur autoroutes en se basant sur les progrès technologiques les plus récents [SHL98]. Les premiers résultats ont été largement médiatisés du fait notamment du côté spectaculaire des démonstrations[1] : sur une autoroute californienne, l'on a pu voir une

[1] Ces expériences ont été menées dans le cadre du programme PATH initié en 1986 dans le but d'optimiser l'utilisation des autoroutes américaines afin de répondre à une croissance fulgurante de la population (et donc de conducteurs potentiels).

flotte de vehicules se succéder à distance réduite et à vitesse élevée, les conducteurs n'ayant auncune tâche de commande à effectuer[2]. Dans cette expérience comme dans beaucoup de projets d'automatisation de la conduite, une infrastructure routière spécifique et dédiée est souvent nécessaire. La conduite automatisée est basée sur l'utilisation de capteurs implantés dans la voie ou tout simplement sur l'homogénéité des véhicules qui doivent tous être à conduite automatique. Pour pouvoir circuler dans un environnement mixte regroupant des véhicules "classiques" et d'autres automatisés, ces derniers devront à terme intégrer des capacités équivalentes aux humains, en terme de perception, évaluation et prise de décisions.

L'augmentation, et à la fois la miniaturisation de la puissance de calcul embarquable dans un véhicule a récemment rendu possible l'utilisation en temps-réel de la vision artificielle et notamment de la stéréovision. On voit de plus en plus se développer des véhicules autonomes se basant sur ces techniques pour définir et suivre leur trajet [BEN02, SOT02]. Les progrès techniques ainsi réalisés rendent applicables les projets considérés comme les plus utopiques il y a de cela une décennie. Il convient à présent de mener une réflexion sur l'intégration sociale de tels véhicules et notamment de soulever la question de la responsabilité si ceux-ci devaient être impliqués dans un accident.

2.2.2. La route intelligente

Le second aspect de la sécurité active se rapproche de l'assistance du conducteur puisqu'il concerne la mise à disposition en temps-réel d'informations sur le trafic routier, de réactualisation d'informations de navigation ou l'intercommunication entre véhicules. En fait, la voiture de demain (quelle soit conduite automatiquement ou non) fera partie d'un système global d'informations dont l'objectif est de **faciliter et d'optimiser la prise de décision** du conducteur. Ainsi, un projet comme "*Urban Drive Control*" (cf. figure 2.1) initié par Fiat, Renault, Jaguar et PSA tente d'optimiser la circulation urbaine avec des conséquences positives sur l'environnement. Il s'appuie sur des technologies comme l'ACC[3] ou le "*Stop & Go*"[4] assistées par un dispositif d'information du trafic routier [HAM97]. Tout comme pour les systèmes d'aide à la conduite ou encore la conduite automatisée, la route intelligente se base sur une meilleure coopération entre le véhicule et l'infrastructure.



FIG. 2.1. : Principe de UDC ("*Urban Drive Control*")

[2]L'asservissement d'une flotte de véhicules en fonction d'un véhicule de tête porte le nom anglais de "platooning".
[3]Acronyme de "*Adaptive Cruise Control*", l'ACC régule la vitesse d'un véhicule en fonction de celui qui le précède. Une conduite plus régulière en terme d'accélération et de freinage est alors obtenue.
[4]Tout comme l'ACC, le "*Stop & Go*" est un dispositif dérivé du régulateur de vitesse classique. Il consiste en une gestion des phases de démarrage et d'arrêt d'un véhicule en fonction de celui qui précède.

2.2.3. L'assistance à la conduite

Dans le cadre de l'assistance à la conduite, l'automobiliste, assisté par des **systèmes facilitant/optimisant l'activité de maîtrise du véhicule**, est responsable de la tâche globale d'asservissement/conduite. D'un point de vue moral mais également légal, l'utilisation d'un DAC ne permet pas au conducteur de se soustraire de ses responsabilités. Dans ce cas de figure, il doit s'assurer d'une conduite sûre. Il est par conséquent devenu impératif d'étudier et d'optimiser les interactions "automobiliste - système d'aide". La réalisation de l'interface entre ces deux acteurs a tout naturellement été placée au centre des travaux de certains chercheurs [MIL99]. Regroupant des chercheurs (principalement universitaires) des secteurs des Sciences Pour l'Ingénieur, des Sciences de la Vie et des Sciences Humaines et Sociales, le GdR CHMAC (Groupe de Recherche sur la "*Coopération Homme-Machine pour l'Aide à la Conduite automobile*") se focalise ainsi en premier lieu sur l'identification des besoins d'aide du conducteur et de leur pertinence avant d'en établir la faisabilité technique.

Suivant le niveau d'assistance recherché dans l'activité de conduite (cf. §1.4.1.1), il conviendra de prendre en compte des informations propres au véhicule, ou alors relatives à l'infrastructure c'est-à-dire à l'environnement proche du véhicule. Pour une assistance de bas niveau (niveau de stabilisation de la figure 1.3), seules des données inhérentes au véhicule sont nécessaires (un régulateur de vitesse n'a besoin que des informations de régime moteur et de freinage) alors que pour une assistance de plus haut niveau (niveaux de navigation ou guidage), des informations extérieures, souvent perçues visuellement par le conducteur sont indispensables (marquage au sol, distance d'éloignement, carte routière...). Dès le début des années 90, des systèmes agissant sur les 3 niveaux (aide à la navigation, aux manœuvres et au contrôle), capables de s'adapter au conducteur en tenant compte de sa disponibilité et de ses limites ont été étudiés. Ainsi, le GIDS ("*Generic Intelligent Driver Support*") avait pour objectif de centraliser et d'analyser la multitude d'informations fournies par des dispositifs électroniques qui équipaient le véhicule, de manière à transmettre au conducteur la "bonne indication au bon moment".

2.2.3.1. Assistance à la commande

Le rôle principal de ce type d'**assistance de bas niveau** est de faciliter l'activité de conduite, et principalement la tâche sensitivo-motrice. Les premiers dispositifs de ce type apparus il y a quelques années déjà sont par exemple la direction assistée ou encore l'assistance au freinage (ABS). Dans le premier cas, il s'agit **d'augmenter les capacités du conducteur** en lui permettant de tourner les roues à moindre effort et cela même à vitesse faible. Dans la seconde approche, le système régule la pression de freinage afin que les roues freinées ne se bloquent (optimisation du freinage) et cela, quelle que soit la pression de freinage initialement appliquée par le conducteur. L'ABS agit en **complément du conducteur** qui ne pourrait être en mesure d'intervenir aussi efficacement et rapidement.

Parallèlement à des dispositifs comme l'ABS, l'assistance à la commande s'est également développée dans le cadre de l'**automatisation de certaines tâches relevant du conducteur**. La plupart des véhicules actuellement mis sur le marché sont pourvus (de série ou en option suivant le niveau de finition) d'un régulateur de vitesse ("*Cruise Control*") qui maintient un niveau de vitesse constant suivant une valeur pré-programmée par le conducteur. L'extension de cette application, par ajout de capteurs de détection de proximité (radar, lidar) a conduit à la récente industrialisation de véhicules (Renault Vel Satis, Mercedes Classe S...) pouvant réguler leur allure en fonction des autres usagers de la route. Ce régulateur de vitesse adaptatif (également appelé intelligent) a, outre l'attrait de l'augmentation du confort de conduite, des effets bénéfiques sur la consommation de carburant.

Les exemples de ce type d'applications sont nombreux tant dans le domaine de la dynamique longitudinale que transversale d'un véhicule. Il est à présent largement envisageable d'asservir un véhicule dans une voie, de gérer des phases de dépassement ou de détecter (et de corriger) d'éventuels écarts d'un véhicule.

2.2.3.2. Assistance à la navigation

Dans la description de Rasmussen (figure 1.8), la navigation représente une des tâches de niveau le plus élévé. Elle fait appel à la connaissance et à la capacité d'adaptation du conducteur se trouvant dans une situation nouvelle.

Le terme générique de système de navigation est en réalité un abus de langage puisque derrière cette dénomination sont regroupés deux types d'aide distincts :

– l'assistance à la **navigation** proprement dite : ce dispositif va faciliter (en s'appuyant sur une cartographie électronique couplée à un système de localisation) la tâche de localisation et orientation effectuée par le conducteur afin que ce dernier puisse convenablement envisager son chemin. Le choix du trajet à suivre demeure du ressort du conducteur,

– l'assistance au **guidage** : les points de départ et de destination préalablement spécifiés par le conducteur, le rôle de l'aide au guidage est de définir, et de signaler au conducteur, l'itinéraire à suivre. Les premières aides ainsi élaborées ne tenaient compte que d'informations obtenues par des capteurs implantés sur le véhicule [TOO87]. L'emergence de la transmission sans fil a rendu possible la réalisation d'assistances qui réactualisent leur itinéraire en fonction des conditions de roulage et de la densité de la circulation. Ces informations sont obtenues par communication temps-réel avec des centres de surveillance.

Les performances de ces assistances sont fortement liées, d'une part à la précision de la cartographie routière, et d'autre part à la nature des capteurs utilisés pour localiser le véhicule. L'utilisation de GPS ne pouvant satisfaire à toutes les conditions de conduite (mauvaises couvertures satellitaires,...), on couple très souvent d'autres instruments de mesure (capteurs inertiels) pour obtenir une information complémentaire par traitement du signal (cf. chapitre 5).

2.2.4. L'assistance au conducteur dans le système "conducteur-véhicule-environnement"

L'aide à la conduite, qui vraissemblablement serait la plus efficace, devrait être en mesure d'analyser les situations de conduite afin de déterminer la nécessité d'une éventuelle intervention. Dans ce cas, le système d'aide doit être convenablement intégré dans la boucle "conducteur-véhicule-environnement" afin de détecter et diagnostiquer au mieux les erreurs d'évaluation du conducteur. Le principe d'intégration de l'assistance à la conduite consiste à minimiser les couplages directs entre l'automobiliste et son véhicule, au profit du copilote intelligent. Ce dernier se retrouve alors à l'interface entre l'environnement, le véhicule et le conducteur. Yuhara *et al.* [YUH98] propose une architecture "conducteur-véhicule-environnement-copilote" (cf. figure 2.2) dans laquelle l'aide à la conduite constitue le maillon central. Il perçoit à la fois les intentions du conducteur [DAG02], lui fournit les informations adéquates, diagnostique l'état du véhicule, et finalement adapte les stratégies de commande selon les besoins.

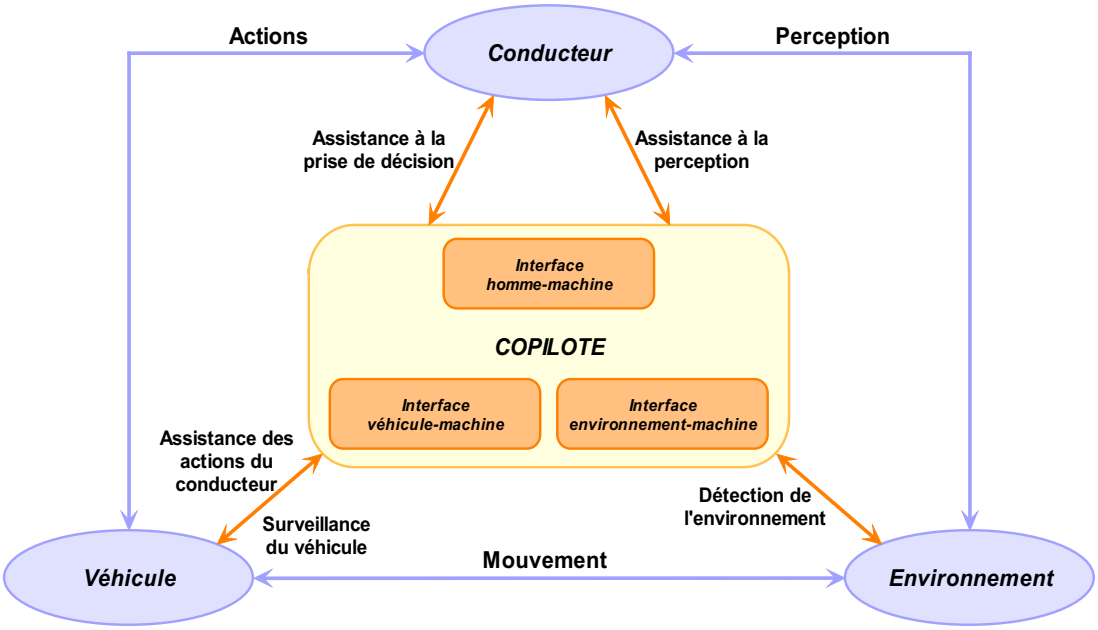


Fig. 2.2. : Le système "conducteur-véhicule-environnement-copilote" selon [YUH98]

2.2.4.1. Les niveaux d'assistance

Le développement d'un DAC[5] nécessite au préalable la définition du niveau d'assistance, et donc d'interaction entre le dispositif et le conducteur. Cette tâche consiste à choisir le niveau d'intervention du DAC dans l'activité du conducteur et permet de définir les niveaux de priorités de chacun dans la tâche de conduite. Cinq niveaux d'assistance ont été définis par Kopf [KOP94], puis repris et étendus à la conduite automatisée par Yuhara *et al.* [YUH98] :

- information,
- conseil,
- avertissement,
- assistance,
- intervention.

Ainsi, dans le cas de dispositifs d'information, de conseil ou d'avertissement, l'action sur le véhicule reviendra toujours au conducteur. C'est l'**aide passive**. Pour des systèmes d'assistance et d'intervention (**aide active**), il conviendra de définir lors de leur conception le niveau de collaboration avec le conducteur.

Lors de la sélection du type d'assistance, des facteurs aussi variés que l'ergonomie, la psychologie, l'aspect cognitif ou encore juridique doivent être considérés. De cette répartition des niveaux d'assistance se détachent deux structures de collaboration dans la prise de décisions entre le conducteur et le copilote intelligent : l'une verticale ou hiérarchique et l'autre horizontale ou hétérarchique.

2.2.4.2. Coopération conducteur - système d'assistance

Structure hiérarchique de prise de décisions

Dans ce type d'architecture, la décision finale revient soit au conducteur, soit au système d'aide à la conduite en fonction du type d'assistance prodigué (actif ou passif). En considérant un **système d'information** du conducteur, l'action à entreprendre sera décidée par l'automobiliste en tenant compte des indications fournies par le dispositif. Dans le cas d'un système actif (le régulateur de vitesse par exemple), le dispositif d'assistance intervient de manière à générer une consigne en adéquation à la situation de conduite. Néanmoins, le conducteur peut, à tout moment, intervenir et demeure prioritaire sur le DAC. La structure ainsi obtenue est illustrée sur la figure 2.3.

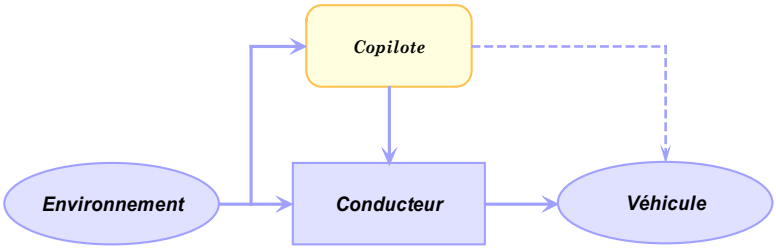


Fig. 2.3. : Structure décisionnelle hiérarchique

Structure hétérarchique de prise de décisions

L'architecture hétérarchique place le conducteur et l'assistance à la conduite sur un même niveau décisionnel, où les sollicitations nécessaires peuvent être déterminées par le conducteur mais également par le copilote (cf. figure 2.4). Ceci est par exemple le cas lors de l'utilisation de superviseurs dont le but est de détecter et d'éviter des situations de conduite critiques : le conducteur reste le principal organe de commande mais à tout moment, il peut être remplacé par l'outil de supervision. L'exemple type de cette structure de collaboration est le dispositif de freinage d'urgence qui agit de manière totalement transparente pour le conducteur. Ce dernier, lorsqu'il détecte une situation potentiellement dangereuse, a tendance à ne pas freiner suffisamment au départ, puis

[5]on exclue la conduite automatisée puisqu'il n'y a alors plus de conducteur par conséquent plus d'assistance possible.

de trop (saturant les pneumatiques). Le rôle du système de freinage d'urgence est d'augmenter la pression de freinage au départ de la manœuvre avant de la réduire à la fin pour optimiser globalement la phase de freinage.

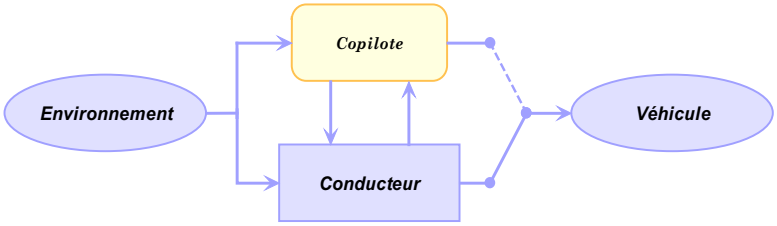


FIG. 2.4. : Structure décisionnelle hétérarchique

2.2.4.3. Le conducteur au cœur du développement

L'ABS, l'un des premiers systèmes actifs mis à la disposition des conducteurs, a été conçu avec pour objectif d'augmenter la sécurité. Pourtant, très vite les constructeurs se sont rendus compte d'un effet pervers qui n'avait pas été décelé lors de sa conception : pour les automobilistes, l'ABS représentait une optimisation du système de freinage leur permettant de retarder la phase de freinage... Or, il est connu que la distance d'arrêt d'un véhicule muni d'ABS est très souvent supérieure à celle d'un véhicule "classique". Cette constation pose le problème de **la perception du système par le conducteur** et de la modification du mode de conduite de celui-ci.

La solution consiste à intégrer le plus tôt possible l'utilisateur final (le conducteur) dans le processus de conception du produit. L'**ergonomie** dont il s'agit ici permet d'identifier les modifications comportementales du conducteur ou l'influence du système sur l'activité globale de conduite [NAT97, NAT98]. L'assistance à la conduite (planification de parcours, régulation de vitesse...) modifie l'activité de conduite dans sa globalité. Le conducteur se trouve déchargé d'une partie des activités qui lui incombaient jusqu'à présent. En contrepartie, il est contraint de traiter davantage d'informations (les systèmes fournissant souvent des indications visuelles, auditives, sensitives... aux conducteurs).

Les études d'ergonomie ont un rôle primordial dans la conception d'un DAC puisqu'elles permettent entre autres de parfaitement définir la répartition des tâches entre l'automobiliste et le système. Elles servent aussi à sélectionner les informations et la manière (sonores, visuelles...) dont il faudra les prodiguer au conducteur.

Très récemment mis sur le marché par plusieurs constructeurs, le régulateur de vitesse intelligent a fait l'objet de ce type de travaux. Ces derniers ont notamment permis de mettre en évidence que la plupart des utilisateurs programment un temps de latence entre leur véhicule et celui qui les précède inférieur aux deux secondes (souvent inférieur à une seconde ! !) imposées par la législation française depuis peu [SER98]. Ces études peuvent/doivent être menées en simulation et/ou en situation de conduite réelle afin d'évaluer également les éventuelles répercussions de l'utilisation d'un tel dispositif sur les autres usagers. L'on passe alors du point de vue microscopique (le conducteur et son véhicule) à un point de vue macroscopique [PAT98] (le conducteur et son véhicule dans l'environnement global de conduite).

2.2.5. L'insécurité liée à l'assistance

Si l'on considère la multiplication des systèmes d'aide fournissant des informations au conducteur, on peut raisonnablement se demander si la multiplication des DAC n'aura pas une influence néfaste sur celui-ci. En effet, le conducteur se retrouvera contraint de traiter un nombre grandissant d'informations. La recherche de l'amélioration de la sécurité, du confort ou encore de l'efficacité des déplacements ne peut-elle pas introduire par ailleurs des facteurs d'insécurité ? Plusieurs sources d'insécurité peuvent être considérées :

- une modification dangereuse des comportements de conduite,
- la prise en compte, la saturation et la perceptibilité des informations,
- la cohabitation entre véhicules équipés et non-équipés de DAC.

Les concepteurs devront par exemple choisir entre les modes d'information du conducteur (signaux visuels, auditifs) en prenant en compte les caractéristiques propres à chaque type : un signal sonore est plus délicat à synthétiser, permet difficilement de fournir simultanément plusieurs informations et peut surprendre le conducteur. Il faut par conséquent, d'une part définir la nature des signaux, et d'autre part l'instant auquel il faut les fournir. C'est dans cette optique que des travaux d'évaluation de la disponibilité du conducteur à recevoir des signaux vocaux ont été menés. Le projet CEMVOCAS[6], a eu pour principal objectif de gérer de manière optimale la diffusion des informations auditives afin d'éviter la saturation.

Un des attraits de l'aide à la conduite est de réduire la charge du conducteur en le délestant des activités les plus contraignantes ou lassantes. En général, il s'agit de gérer à l'aide d'un DAC des tâches de bas niveaux décrites dans le modèle de Rasmussen. Pourtant, ce sont justement ces activités de fréquences élevées qui ont tendance à maintenir le conducteur attentif à la situation de conduite. Lors de l'utilisation normale d'un DAC, l'activité du conducteur se trouve réduite mais peut brusquement évoluer et demander au conducteur de gérer des tâches de haut niveau dans le cas où le système se trouve en défaut. Dans ce cas de figure, il faut éviter que le conducteur ne soit surpris du passage trop brutal d'un rôle de superviseur (le dispositif agissant à sa place) à un rôle de contrôleur. Il convient alors, d'une part de ne pas réduire l'activité de conduite à un seuil qui pourrait être néfaste, et d'autre part d'intégrer dans les systèmes d'aide une phase de supervision du conducteur. Le but de celle-ci est d'évaluer son attention et ses capacités (mentales, physiques...) de conduite.

2.2.6. De nombreux projets d'assistance

Pour rendre la **conduite plus sûre**, permettre **davantage de mobilité** ou **améliorer l'efficacité des transports**, un grand nombre de projets souvent connexes sont en cours. Ils réunissent des acteurs industriels (plusieurs constructeurs automobiles) mais également des laboratoires de recherche privés ou universitaires et sont souvent inter-disciplinaires (des sciences pour l'ingénieur aux sciences humaines et sociales). Cette pluridisciplinarité permet de prendre en compte, tant les aspects techniques, économiques que psychologiques lors du développement d'un DAC. Dans cette section seront recensés les principaux projets fédératifs européens que sont ARCOS2003, PAROTO ou encore ROADSENSE.

Action fédérative élaborée dans le cadre du PREDIT[7], le projet ARCOS2003 ("*Action de Recherche pour une COnduite Sécurisée*") vise à renforcer l'efficacité du système "véhicule-conducteur-environnement" en améliorant la qualité et la fiabilité des interactions entre les trois acteurs du système. Les participants à ce projet (40 partenaires dont Renault, PSA, l'INRETS, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, l'Heudiasyc...) misent sur une intégration de l'ensemble des systèmes d'aide en un dispositif global prenant en compte les autres usagers. ARCOS se focalise sur trois objectifs techniques précis :

- renforcer la sécurité de proximité du véhicule,
- développer des systèmes d'alerte prévenant des évènements altérant la sécurité sur des zones d'influence large,
- assister le conducteur pour renforcer la sécurité des fonctions de contrôle-commande permettant d'assurer le mouvement du véhicule.

PAROTO, "*Projet Anticollision Radar et Optronique pour l'auTOmobile*" est né d'une étude montrant que 50 à 70% des accidents pourraient être évités avec un système anti-collision. Dans PAROTO, la gestion de l'allure du véhicule s'opère, d'une part par l'intermédiaire d'un régulateur de vitesse intelligent (ACC) utilisant un radar, et d'autre part par l'intégration de caméras infrarouges assurant la détection de piétons, d'obstacles statiques ou dynamiques. Les principaux acteurs de ce projet sont l'INRETS, le Lasmea, Team et Sagem.

Réunissant Daimler-Chrysler, BMW, le Clepa, Cofiroute, Renault, PSA et Fiat, le projet ADASE ("*Advanced Driver Assistance Systems in Europe*") concerne la sécurité, l'efficacité des transports et le confort. Il se base sur une approche globale des systèmes d'aide dont l'idée consiste à utiliser des capteurs communs à plusieurs dispositifs afin d'optimiser le potentiel du véhicule.

[6] "*CEntralised Management of VOCal interface aiming a better Automotive Safety*" a été entrepris par le laboratoire LESCOT de l'INRETS, en partenariat avec des constructeurs, des industriels spécialisés en acoustique, l'Université Technique de Lisbonne et des spécialistes en reconnaissance vocale.

[7] Programme national de recherches et d'innovation dans les transports terrestres

CARSENSE, qui s'inscrit dans le cadre de ADASE, est un projet axé "capteurs et fusion de données" pour l'augmentation des capacités de détection du véhicule. Le principe de redondance des informations pour la détection d'obstacles fixes est largement mis en avant par les partenaires Thales, TRW, Renault, BMW, Fiat, l'INRETS, l'INRIA et le LCPC.

"*ROad Awarness for Driving via a Strategy that Evaluates Numerous SystEms*" fédère des partenaires tels que Jaguar, Renault, Porsche ou encore le Lasmea. Destinés à faciliter l'activité de conduite en aidant le conducteur, les DAC peuvent également avoir des effets néfastes (cf. §2.2.5) comme la baisse de vigilance ou la difficulté d'utilisation. Le programme ROADSENSE part de ce constat pour tenter de définir un standard d'interface homme-véhicule, basé sur la sécurité et focalisé sur le conducteur. Le but étant une introduction plus rapide et sans inconvénient d'usage des systèmes de sécurité.

Acronyme de "*La Route Automatisée*", LaRA est un consortium créé par des instituts publics (INRETS, INRIA) avec la participation d'industries et d'organisations françaises. Les objectifs de ce programme sont :

- augmenter la sécurité,
- minimiser la consommation d'énergie,
- offrir un environnement plaisant,
- offrir de nouveaux moyens de transport disponibles pour tous.

LaRA est principalement centré sur la mise en œuvre d'aides à la conduite allant du système d'information jusqu'à une automatisation complète de l'activité de conduite.

2.3. Le projet "Navigation Aided Intelligent Cruise Control"

2.3.1. Objectifs généraux

Le projet "*Navigation Aided Intelligent Cruise Control*" a été entrepris dans le but d'améliorer le confort et à terme la sécurité des occupants d'un véhicule routier. Le procédé consiste à fournir en temps-réel une aide à la conduite efficace sur tout type de routes [BAS99]. L'intégration d'une telle application dans le système bouclé "conducteur-véhicule-environnement" est basée sur une connaissance précise du conducteur placé au centre de cette étude (cf. chapitre 3).

Cette thèse illustre les travaux concernant le développement d'un DAC dont le principe est fondé sur l'asservissement (longitudinal et latéral) d'un véhicule assisté par un système de localisation. Un grand nombre de dispositifs de sécurité active ont été récemment mis en œuvre et intègrent progressivement nos véhicules. On rappellera, pour exemple, l'ABS (universel à présent), le TCS (antipatinage au démarrage), le régulateur de vitesse ou encore le système de navigation par GPS. Pour l'heure, l'ensemble de ces dispositifs sont indépendants, alors qu'ils sont d'une complémentarité évidente. Une idée majeure est par conséquent d'exploiter au maximum les avantages et caractéristiques de différents organes de sécurité ou d'assistance en les intégrant dans une même architecture. Le choix a été fait de fournir une aide au conducteur lors de la prise de virage, qui est une des phases de conduite potentiellement dangereuses. La stratégie proposée s'articule en 4 étapes :

- localiser le véhicule en se référant à une base de données routière,
- définir les caractéristiques de l'environnement proche en terme de limitations de vitesse, topographie...,
- définir des références de trajectoires et de vitesses appropriées à la situation,
- informer/avertir le conducteur (assistance passive) et/ou agir sur le véhicule (assistance active).

La figure 2.5 illustre la structure de NAICC. Un dispositif de localisation du véhicule et de détermination de l'environnement d'évolution supplé aux boucles d'assistances latérale et longitudinale. Pour envisager une telle aide à la conduite, il est impératif que la localisation du véhicule soit précise. Ceci nécessite d'une part, d'utiliser des techniques de positionnement fiables en toutes circonstances (conduite urbaine, extra-urbaine...). D'autre part, une description du profil routier (cartographie) relativement complète (précision de description, informations sur l'environnement proche...) est nécessaire. Les bases de données couramment employées par les systèmes de navigation ont, pour la plupart, été développées spécifiquement pour ceux-ci et ne sont pas adaptées aux besoins des DAC en cours de développement. Une des activités entreprises au cours de ces travaux a donc

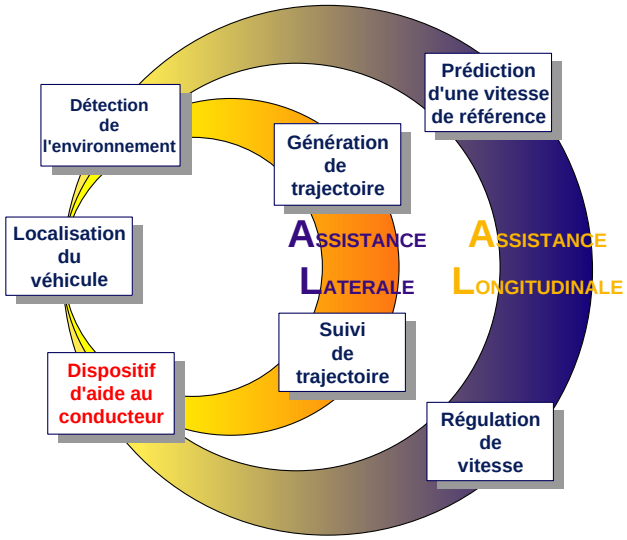


FIG. 2.5. : Structure de NAICC

consisté à développer une base de données étendue, contenant les informations nécessaires au système NAICC (cf. chapitre 5).

2.3.2. Phases d'évolution du projet

La démarche amorcée s'oriente sur la détection d'une vitesse et/ou d'une trajectoire inappropriée à l'environnement de conduite, pouvant aboutir à une situation critique. L'évolution de ce projet est définie suivant 3 axes :

- dans un premier temps, NAICC sera un **système d'information** mis à la disposition du conducteur. L'objectif est alors de lui signaler la consigne appropriée à la situation détectée,

- dans un deuxième temps, il sera considéré comme une **assistance active** dont le but est d'asservir la vitesse et/ou la trajectoire du véhicule sur routes ouvertes et cela, en fonction des caractéristiques du profil routier. Il s'apparente alors aux dispositifs récemment mis sur le marché (ACC) et gérés entièrement par le conducteur (mise en marche, arrêt...) mais se démarque de ceux-ci par sa gestion de l'environnement géographique. Ainsi, une fois mis en marche par le conducteur (lorsque celui-ci estime que toutes les conditions d'utilisation sont réunies), le dispositif adapte la consigne spécifiée en fonction du profil routier,

- enfin, dans une dernière évolution, NAICC intègrera des capacités de **supervision de la tâche de conduite** et pourra ainsi intervenir à tout moment, et de manière transparente pour le conducteur, lorsqu'une phase potentiellement dangereuse est détectée. Son fonctionnement s'apparente alors à celui du récent dispositif ESP, qui corrige la trajectoire d'un véhicule en courbe par le freinage de l'une ou l'autre roue sans que le conducteur en soit conscient.

L'ouverture, à la fois matérielle et logicielle de NAICC (cf. chapitre 6), laisse entrevoir un potentiel d'évolution important dans les domaines de la **perception** et du **traitement de l'information** mais également dans ceux de la **commande**, du **diagnostic**... Son originalité réside dans l'association d'aides intervenant à différents niveaux dans le schéma élaboré par RASMUSSEN. En effet, la localisation relève à la fois de la connaissance et du comportement procédural du conducteur alors que l'asservissement de vitesse ou de trajectoire relève de l'entrainement et de la pratique.

2.3.3. Stratégie

2.3.3.1. Estimation, adaptation et reconfiguration

La figure 2.6 présente trois niveaux sur lesquels le système d'assistance s'appuie pour déterminer une aide appropriée à la fois à la situation de conduite, au conducteur et au véhicule. Ces niveaux représentent les interactions entre le conducteur et son véhicule. Ils ont pour principal objectif d'adapter la consigne soumise par le conducteur à la situation de conduite lorsque le DAC détecte une inadéquation entre les deux. L'intérêt du dispositif d'aide réside dans :

1. l'estimation d'une référence satisfaisant à la fois à la situation de conduite, au conducteur et au véhicule,
2. sa propre adaptation pour tenir compte des paramètres variants dans le temps (adhérence, conditions météorologiques, état du conducteur...),
3. sa reconfiguration dans le cas de situation critique. Cette reconfiguration peut par exemple mener à un changement de loi de commande, voire de modèles, suivant la situation détectée.

De manière à répondre à ces trois objectifs, l'assistance devra à terme s'appuyer sur des méthodes d'analyse et de prise de décisions jusqu'ici propres au comportement du conducteur.

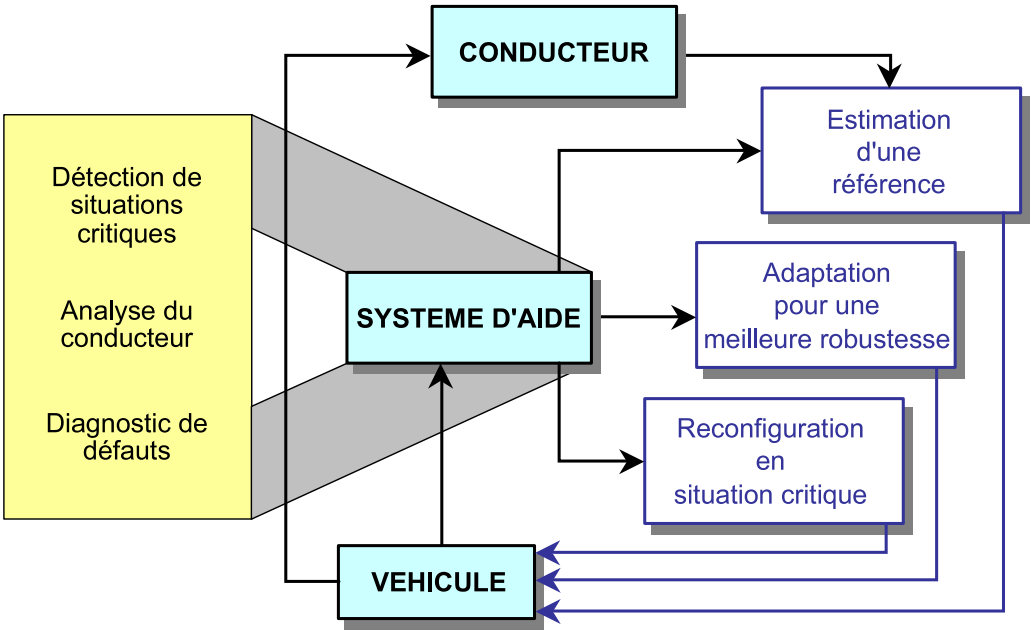


FIG. 2.6. : Stratégie générale de NAICC

2.3.3.2. Coopération NAICC - conducteur

Dans le cadre du projet NAICC, deux schémas de collaboration ont été envisagés :

- **l'assistance passive** : le système informe le conducteur en cas de détection d'un changement de situation de conduite (passage d'une conduite en ligne droite à une prise de virage...), mais le conducteur est le seul à agir sur le véhicule. Il se base donc fortement sur **l'anticipation** et doit être en mesure de fournir les informations adéquates en temps et en heure,
- **l'assistance active** : NAICC informe également le conducteur du danger, et si le conducteur le désire[8], intervient sur le véhicule en réduisant sa vitesse dans le mode de gestion de vitesse, et/ou en réduisant l'écart déterminé par rapport à une trajectoire de référence dans le mode d'assistance latérale.

[8]Nous rappelons, que dans un premier temps, le conducteur devra mettre en marche le DAC (cf. §2.3.2), mais qu'un mode de supervision est envisagé.

De ces deux schémas de fonctionnement découlent deux architectures de collaboration entre NAICC et le conducteur : l'utilisation en boucle ouverte (**assistance passive**) est calquée sur l'architecture hiérarchique (verticale). L'utilisation en boucle fermée (**assistance active**) est caractérisée par une architecture horizontale dans laquelle le conducteur et le système d'assistance sont au même niveau hiérarchique, sont connectés aux actionneurs et ont la possibilité de déterminer les actions de commande.

Assistance passive : collaboration verticale

Maître de son véhicule à chaque instant, le conducteur est informé des niveaux de vitesse appropriés et/ou des écarts de trajectoire qu'il commet mais reste libre dans le choix des actions de commande à appliquer au véhicule.

Assistance active : collaboration horizontale

Dans ce mode de fonctionnement illustré sur la figure 2.7, ce dispositif ne doit pas être considéré comme un limiteur[9] qui pourrait être perçu par le conducteur comme une contrainte. Il s'inspire du principe du régulateur de vitesse consistant à soulager le conducteur (en réalisant les actions de commande à sa place). En outre, l'automobiliste conserve la responsabilité en cas de non respect des règles de sécurité. Le rôle du conducteur évolue alors d'**opérateur** vers celui de **superviseur** : **son activité doit se focaliser sur la perception des évènements extérieurs qui pourraient rendre dangereux l'utilisation de la conduite "assistée"**. C'est par ailleurs sur ce changement de statut qu'il conviendrait sans doute de focaliser les débats lorsque ce type de systèmes sera commercialisé. Il convient de rendre l'automobiliste attentif au fait que, si on le décharge de cette activité, ce n'est pas pour lui permettre de faire autre chose à la place, mais qu'au contraire, il doit être en mesure de rapidement intervenir.

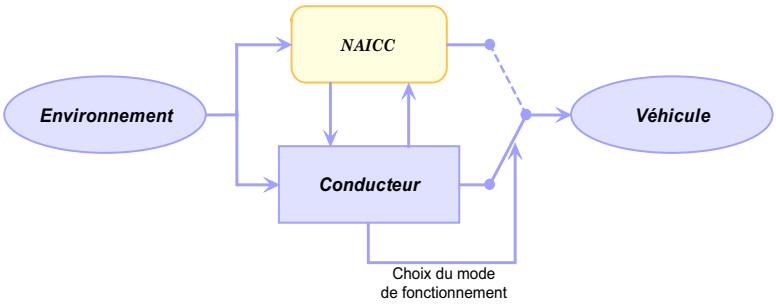


FIG. 2.7. : Coopération horizontale entre NAICC et le conducteur

2.3.4. Structure du système d'aide à la conduite

Le projet NAICC intègre deux axes de recherche constituant la majeure partie des activités du conducteur lors de la tâche de conduite : la régulation de vitesse et le contrôle de trajectoire. Effectivement, l'automobiliste est sans cesse obligé, en fonction des informations qu'il prélève sur l'environnement, de définir une vitesse et une position appropriées à la situation de conduite.

NAICC est basé sur la détermination de consignes de référence (vitesse et trajectoire) servant à définir les sollicitations adéquates en fonction de la localisation du véhicule. Dès lors, on constate l'importance des deux entités communes à l'assistance longitudinale et latérale : la localisation et la détection de l'environnement.

2.3.4.1. Localisation du véhicule et détection de l'environnement

La première étape consiste à déterminer l'environnement d'évolution du véhicule en localisant ce dernier (cf. "Module de localisation", figure 2.8). Pour cela, des capteurs couplés à une cartographie numérisée du réseau rou-

[9] Un projet de ce type mené par Renault en partenariat avec PSA est actuellement en cours d'expérimentation et durant toute l'année 2003 dans la région parisienne. En couplant un GPS et un limiteur de vitesse, cette opération vise à contraindre automatiquement la vitesse en fonction des seuils imposés par la réglementation.

tier sont employés. Cette tâche effectuée, NAICC est en mesure de définir les conditions d'évolution du véhicule en terme de types de routes (autoroutes, nationales, départementales...), de situations géographiques (conduite urbaine, extra-urbaine...) ou encore de règlementation (limitation de vitesses, interdiction de dépassement...). La tâche de localisation se fait en 2 étapes :

- le **positionnement** : les capteurs sont utilisés pour définir la position du véhicule dans un repère galiléen absolu. Cette étape ne permet pas de connaître l'environnement du véhicule,
- la **corrélation cartographique** : appelée également "Map-Matching", cette étape a pour but de localiser le véhicule dans la base de données.

Par la suite, il sera donc fait une différence entre le positionnement et la localisation du véhicule. Le positionnement sera défini comme le résultat de la fusion multisensorielle permettant de déterminer la configuration (position et orientation) du véhicule. La localisation, quant à elle, ajoute un degré d'information au positionnement en définissant le lieu géographique où se situe le véhicule.

Une fois le véhicule localisé, le système définit les caractéristiques de l'assistance longitudinale et/ou latérale.

2.3.4.2. Assistance longitudinale : régulation adaptative de vitesse

A la suite de la localisation, NAICC détermine dans un premier temps le profil de vitesse adéquat à la situation de conduite potentiellement dangereuse détectée (virage, intersection...). Dans un second temps, le système s'attache à définir les caractéristiques d'une éventuelle phase de freinage (distance de freinage nécessaire, potentiel de freinage...) en tenant compte de la vitesse réelle du véhicule[10].

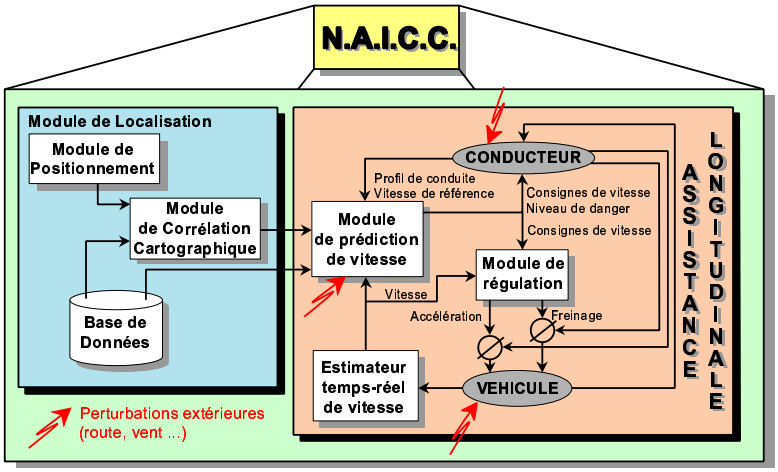


FIG. 2.8. : NAICC : l'assistance longitudinale

Cette étape utilise principalement les informations issues de la localisation du véhicule, les informations topographiques contenues dans la base de données, les caractéristiques du véhicule (potentiel de freinage disponible...) et le profil du conducteur (novice, expérimenté...) comme l'illustre la figure 2.8. Par conséquent, le résultat de cette estimation est directement lié, d'une part à la précision de la localisation (donc des capteurs et des algorithmes utilisés...), et d'autre part à la fidélité de modélisation du réseau routier.

Finalement, les deux stratégies d'assistance évoquées plus haut sont possibles : l'assistance passive informant le conducteur d'un niveau de vitesse inapproprié, et l'assistance active corrigeant la vitesse du véhicule ("*Module de régulation*"). La figure 2.8 reproduit les caractéristiques de l'assistance longitudinale de NAICC ainsi que la structure du module de localisation.

[10] celle-ci sera, dans la première version de NAICC présentée ici, mesurée à l'aide d'un capteur optique et estimée à partir de grandeurs facilement observables (vitesses roues...) dans une version ultérieure. Pour ce faire, des travaux d'estimation des vitesses longitudinale et transversale ont été menés au sein de l'équipe MIAM [POR98].

2.3.4.3. Assistance latérale : contrôle de trajectoire

L'assistance latérale est fondée sur une architecture similaire, intégrant le module de localisation présenté ci-dessus. Elle est basée sur l'estimation d'une référence de trajectoire ("*Module de génération de trajectoire*"). Celle-ci est déterminée en adéquation avec le profil du conducteur, la situation de conduite (négociation d'un virage...), les caractéristiques du véhicule et du profil routier. Le procédé de prédiction de trajectoire peut être comparé à la génération de trajectoires mise en œuvre pour les robots mobiles autonomes. L'objectif est de définir une référence continue en tout point afin que le véhicule puisse être asservi convenablement par rapport à cette consigne (cf. chapitre 3). Finalement, cette référence est utilisée afin de déterminer les éventuels écarts effectués par le conducteur pour l'en avertir ou pour entreprendre, le cas échéant, une correction.

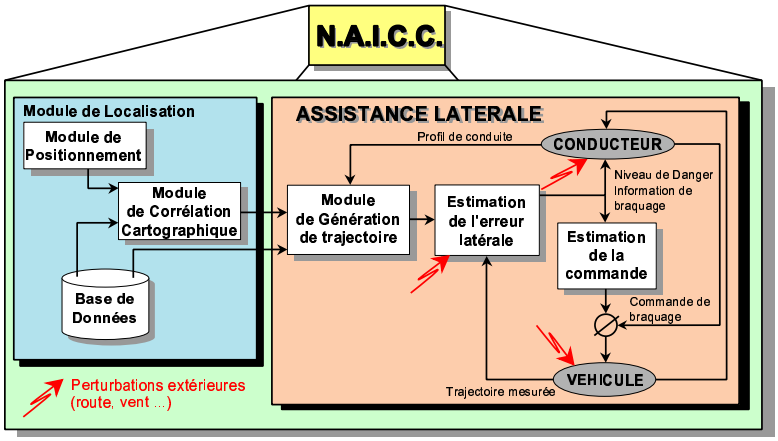


FIG. 2.9. : NAICC : l'assistance latérale

2.3.5. Couplage des assistances longitudinale et latérale

Bien que sur la figure 2.5 les deux aspects d'assistance soient indépendants et qu'ils aient fait l'objet de spécifications distinctes, un fort couplage entre les parties longitudinale et latérale apparait. Celui-ci est fortement lié à la spécificité de la situation de conduite : minime lors de la conduite en ligne droite (à vitesse établie, le conducteur n'effectue que des corrections au volant pour corriger la position et l'orientation du véhicule), ce couplage devient primordial lors de manœuvres particulières (dépassement, évitement, prise de virages...).

Des critères comme le confort, la sécurité ou encore les habitudes de conduite du conducteur vont permettre à ce dernier de définir la trajectoire et le niveau de vitesse qui lui semble appropriés. Ces critères subjectifs sont corrélés à des indicateurs objectifs déterminés dans certaines études : le confort est par exemple en relation avec le niveau d'accélération (longitudinale, transversale ou verticale) auquel est soumis le conducteur. Dans une séquence de prise de virage par exemple, le conducteur, suivant ces exigences et son profil de conduite, va choisir sa trajectoire et les sollicitations longitudinales associées en fonction des phénomènes physiques agissant sur le véhicule. La force centrifuge est un des phénomènes influençant le conducteur. Celle-ci est directement liée, à la fois à la vitesse et au rayon de courbure de la trajectoire. Nous montrons, dans le chapitre 3, sur la base d'expérimentations menées sur deux classes de conducteurs, que certains ont une conduite "régulière" basée sur des trajectoires en courbe de rayon quasi-constant. Cette conduite permet de ne pas être soumis à de fortes variations d'accélérations longitudinale et transversale. Pour d'autres, plus expérimentés ou peut-être plus sportifs, le freinage en entrée de virage sera appuyé et plus tardif (sollicitations longitudinales importantes) alors que la trajectoire sera caractérisée par une forte variation de son rayon. De plus, pour ce type de conducteur, les sollicitations longitudinales et latérales sont souvent couplées, traduisant un freinage et à la fois un braquage du volant.

Ces propos, appuyés par l'étude trajectographique présentée dans le chapitre 3, illustrent pleinement le fait que lorsque le conducteur définit la trajectoire qu'il souhaite suivre, il y associe également les sollicitations longitudinales nécessaires. Par conséquent, pour élaborer une **solution durable du point de vue de l'assistance au conducteur** (adaptée à son profil), il semble incontournable d'intégrer à la fois la dynamique longitudinale

et transversale. C'est pour cette raison que NAICC a pour objectif de définir **un profil de vitesse associé à une trajectoire**.

2.3.6. Objectif global de la thèse

Devant les ambitions que nourrit un tel projet, cette thèse a pour but d'initier les axes de recherches envisageables afin, à plus long terme, de parvenir à la réalisation d'un **système autonome et adaptatif**. Pour l'heure, les travaux menés et présentés dans ce mémoire concernent le premier point cité dans le paragraphe relatif aux phases d'évolution du projet (cf. §2.3.2). Il s'agit en effet de mettre en œuvre un **dispositif d'assistance passif, basé sur l'information du conducteur**. Dans cette première phase de conception, l'aspect primordial de la sélection du mode d'information (études érgonomiques) du conducteur n'a pas été abordé. On s'intéresse en particulier à la détermination d'une référence de trajectoire et d'un profil de vitesse en rapport avec le style de conduite de l'automobiliste. L'idée consiste à utiliser ces références pour effectuer à terme un asservissement à la fois longitudinal et latéral.

Par conséquent, ces travaux visent l'identification d'un modèle interne de trajectoire couplée à une vitesse en adéquation avec le profil routier, le conducteur et les caractéristiques du véhicule.

Finalement, ce travail de thèse reflète la volonté forte de mise en application des recherches menées, et c'est dans ce contexte qu'un véhicule Renault Scenic a été instrumenté. Le chapitre 6 présente des résultats d'expérimentations établies à partir de cette plate-forme.

2.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire le cadre dans lequel s'intègre les travaux qui seront développés au cours de ce mémoire. Actuellement, bon nombre de solutions modernes sont utilisées pour accroître la sécurité des conducteurs ou plus généralement des occupants d'un véhicule routier. On assiste en effet à une intégration massive d'organes de sécurité passive, le plus connu étant sans conteste l'airbag.

Parallèlement à la sécurité passive, les constructeurs ainsi que les équipes de recherches fournissent d'importants efforts dans le domaine de la sécurité active. Dans cette optique, deux stratégies sont défendues. Celles-ci découlent d'une constatation commune dans laquelle le conducteur est directement mis en cause. Effectivement, un fait avéré par de nombreuses études statistiques concerne la responsabilité du conducteur dans la plupart des accidents. Une stratégie consiste alors à fournir un soutien (sous forme de dispositif électronique d'assistance) au conducteur en partant du principe que l'objectif est **d'accroître la perception de l'automobile par le conducteur** donc d'axer le travail sur l'interface entre ces deux acteurs. A l'opposé, l'on considère que si le conducteur est la principale source d'accidents, la sécurisation et l'accroissement de l'efficacité des transports (notamment urbains) passent par une automatisation complète de la conduite. Dans ce cas, le conducteur se trouve déchargé de son action de régulation.

C'est dans un objectif d'accroissement de la sécurité en fournissant un soutien au conducteur que nous proposons le projet "*Navigation Aided Intelligent Cruise Control*" (cf. §2.3). Celui-ci consiste à définir une aide à la conduite assistée par un système de localisation. A partir d'une localisation géographique du véhicule sur une base de données routière, NAICC définit une consigne de trajectoire et la vitesse associée en adéquation avec la situation de conduite détectée. Dans la suite du manuscrit, nous allons nous intéresser à la démarche de détermination de ces modèles internes. Le principe réside dans la modélisation du conducteur et plus particulièrement de sa trajectoire en courbe (cf. chapitre 3). L'outil mathématique employé pour cela possède l'avantage de fournir aisément le profil de vitesse associé à la trajectoire générée (cf. chapitre 4).

Deuxième partie .

Contribution à l'assistance latérale et longitudinale d'un véhicule

Chapitre 3

Modélisation du conducteur pour l'assistance latérale à la conduite

"*Au lieu de vous occuper de la conduite des hommes, regardez plutôt passer les femmes.*"

Louis Aragon

Sommaire

3.1. Introduction 42
3.1.1. Objectifs 42
3.1.2. Méthodologie 43
3.2. Planification et génération de trajectoires : état de l'art 43
3.2.1. Chemins à courbure discontinue 44
3.2.2. Chemins à courbure continue 44
3.2.3. Approches retenues 47
3.3. Splines polaires 47
3.3.1. Notations 48
3.3.2. Repère polaire 48
3.3.3. Formalisme selon Nelson 50
3.3.4. Généralisation 51
3.4. Le conducteur : étude trajectographique 53
3.4.1. "Points objectifs" d'une trajectoire en courbe 54
3.4.2. Analyse de la trajectoire en courbe 56
3.4.3. Identification du modèle 62
3.5. Identification du modèle polaire 64
3.5.1. Indicateurs du comportement conducteur et environnement 64
3.5.2. Quantification objective des indicateurs du comportement conducteur 65
3.5.3. Application à la génération automatique de trajectoires 71
3.6. Suivi de trajectoires : état de l'art 75
3.6.1. Commande par distance de pré-visualisation 76
3.6.2. Commande par modèle véhicule 77
3.6.3. Synthèse 79
3.7. Conclusion 79

3.1. Introduction

L'étude de l'asservissement latéral d'un véhicule mène à deux applications possibles :

- l'automatisation de la conduite : on substitue au conducteur un dispositif capable, d'une part d'asservir le véhicule dans sa voie de conduite, et d'autre part de reproduire l'ensemble des manœuvres habituellement effectuées par celui-ci,
- le développement de systèmes d'assistance au conducteur, conservant l'automobiliste dans la boucle de régulation en lui fournissant l'aide nécessaire à la réalisation de la tâche de conduite. Ceci nécessite de prendre en compte le comportement du conducteur.

Néanmoins, et aussi paradoxal que cela puisse paraître, le développement d'un DAC demeure certainement l'approche la plus délicate puisqu'elle conserve le conducteur dans la boucle d'asservissement et nécessite donc de gérer les interactions avec ce dernier [PEN94].

L'aspect d'asservissement latéral de NAICC a été abordé par une approche couramment employée dans le domaine de la robotique mobile et consistant, dans un premier temps à définir un chemin permettant de satisfaire des conditions imposées. Dans un deuxième temps, il s'agit d'asservir le véhicule suivant le trajet généré[1]. Certaines conditions pouvant être prises en compte lors de la détermination du chemin sont par exemple :

- la présence ou non d'obstacles sur le chemin du véhicule,
- les contraintes intrinsèques au véhicule tel le rayon de braquage minimum avec lequel il pourra se déplacer,
- la commandabilité du véhicule suivant la trajectoire générée,
- ...

La particularité de notre démarche réside dans le fait que **le chemin généré est déduit d'une phase de modélisation de trajectoires de différentes catégories de conducteurs**.

3.1.1. Objectifs

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'algorithme de génération de trajectoires mis en œuvre. Lors de l'élaboration de cet algorithme, l'accent a été mis sur :

- la volonté de définir une **trajectoire correspondant au profil du conducteur** (donc la plus réaliste possible) que le système doit finalement assister : dans l'objectif de la conception d'un DAC, il paraît naturel d'asservir le véhicule suivant une trajectoire proche de celle qu'emprunterait l'automobiliste lors de situations normales de conduite. La solution retenue doit permettre de modéliser différents types de conducteurs donc potentiellement différentes trajectoires (du point de vue de l'**aspect géométrique mais également dynamique**),
- **la génération de trajectoires pour des situations de conduites spécifiques** durant lesquelles le conducteur doit être assisté : avant d'être étendu à des situations plus complexes de conduite, l'algorithme est validé dans les cas les plus intéressants (en terme de dynamique) qui sont les virages,
- le choix de **ne pas prendre en compte, dans le module de génération de trajectoires, les obstacles** éventuels pouvant se trouver sur la voie : la raison et la justification de ce choix seront présentées dans le paragraphe 3.2.3,
- la nécessité de **définir une trajectoire de référence permettant par la suite un asservissement performant du véhicule** : une trajectoire comportant des discontinuités en terme de position, de cap ou de courbure (cf. §3.2.1) est difficilement utilisable pour effectuer l'asservissement fiable d'un véhicule,
- la possibilité du **calcul en temps-réel des caractéristiques de la trajectoire** : cette contrainte est bien sûr rédibitoire puisque le système doit être reconfigurable et réactif aux changements de conditions d'évolution du véhicule.

[1] Dans le premier cas, on parle de planification, voire de génération de trajectoires ("*Path Planning*") et de suivi de trajectoires ("*Path Tracking*") dans le deuxième cas.

3.1.2. Méthodologie

La solution retenue se base sur l'utilisation de ***splines polaires*** (encore appelés ***polynômes polaires*** par la suite) assurant une continuité de premier et deuxième ordre tout au long de la trajectoire. Ceci offre à la fois une continuité de position, de cap, de vitesse mais également d'accélération et de courbure. L'originalité de la méthode réside dans l'utilisation de ces splines pour la **modélisation de trajectoires de différents types de conducteurs par rapport à un référentiel lié au profil routier**. Ainsi, en considérant que le profil du conducteur ait été prédéterminé par le DAC, ce dernier est en mesure de définir la trajectoire adéquate en se référant à ce profil mais également à la topologie de la route, contenue dans la base de données (cf. chapitre 5).

Par la suite, cette section s'attache tout particulièrement à présenter la démarche suivie pour l'obtention d'une trajectoire de consigne satisfaisant à l'ensemble des critères mentionnés ci-dessus. Finalement, les différentes méthodes envisageables de suivi de trajectoire seront abordées.

3.2. Planification et génération de trajectoires : état de l'art

La planification/génération de trajectoires est apparue dans le domaine de la robotique au début des années 80. En particulier, les robots assimilables à des voitures (possédant un train arrière fixe et un train avant directionnel) ont fait l'objet de la majorité des recherches. L'intérêt étant pour ceux-ci qu'à partir de configurations[2] initiale et finale connues, ils se déplacent de façon autonome à travers l'environnement. A la planification/génération de trajectoires se trouve donc très fréquemment associé un module de **suivi de trajectoire** dont l'objectif est de définir les actions de commande nécessaires (vitesse de propulsion du robot, orientation du train avant) à la poursuite de la consigne (cf. figure 3.1).

Les robots de type véhicule nécessitent des méthodes de génération de trajectoires spécifiques prenant en compte des contraintes physiques/cinématiques intrinsèques aux véhicules. Citons comme exemple la limitation de la direction des déplacements du fait du braquage maximum des roues. Un système sujet à ce type de contraintes affectant les déplacements possibles porte le nom de **système non-holonome**.

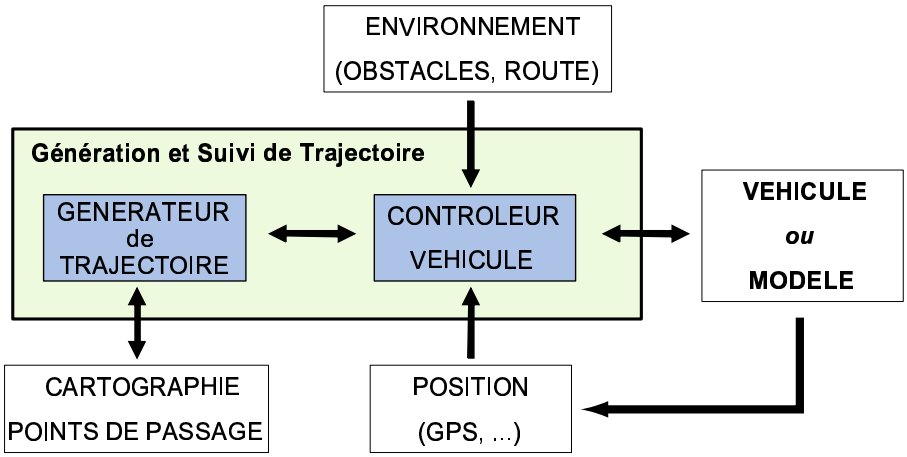


FIG. 3.1. : Asservissement d'un véhicule par génération de trajectoire

Dans la littérature consacrée à ce sujet, certains auteurs font une distinction entre la **planification** et la **génération** de trajets. Un algorithme de planification globale tient compte des caractéristiques cinématiques du robot ainsi que de la présence d'obstacles éventuels. La génération de trajectoires fait initialement abstraction des obstacles pour définir la trajectoire, et ne les considère que lors du suivi de celle-ci [LAU99, SCH97]. **Il convient de noter que dans un premier temps, nous présentons les méthodes de planification et de génération de trajectoires sans distinction entre ces deux catégories**. L'intérêt réside dans la volonté de décrire les différentes solutions possibles.

[2]On préfèrera employer le terme général de *configuration* plutôt que celui de *position*. La position est représentée par le couplet de coordonnées cartésiennes (x, y) d'un point, alors que souvent, la localisation d'un robot est définie par une position cartésienne (x, y) associée à une direction (cap), voire une courbure κ.

Cette partie synthétise les techniques et outils mathématiques employés pour la planification et la génération de chemins dans le domaine de la robotique (nous nous intéresserons en particulier aux robots mobiles de type véhicule).

3.2.1. Chemins à courbure discontinue

Initialement, la majorité des applications de planification (ou génération) pour des robots de type voiture utilisait, pour représenter la trajectoire cible, des segments de droite connectés tangentiellement à des arcs de cercle. Afin d'optimiser la trajectoire générée, on cherchait à minimiser le rayon. L'intérêt de cette solution s'explique principalement par deux raisons [SCH96a, FRA02] :

1. cette catégorie de trajectoires est en réalité **le plus court chemin possible**, entre deux configurations (position et orientation) connues, pour un robot de type véhicule se déplaçant uniquement en avant [DUB57] ou en avant et en arrière [REE90],
2. la facilité de calcul d'une trajectoire formée de segments et d'arcs de cercle.

Néanmoins, cette solution souffre d'un inconvénient majeur qui est la discontinuité de la courbure de la trajectoire aux points de jonction entre les segments de droite et les arcs de cercle[3]. Cette discontinuité se traduit directement par une impossibilité de suivre de façon précise la trajectoire sans arrêter le véhicule aux points de jonction afin de réorienter les roues directrices [SCH96a].

Par conséquent, il est facilement concevable que cette catégorie de chemins (appelés chemins de "Reeds & Shepp", du nom de leurs auteurs) ne peut être utilisée pour notre application.

3.2.2. Chemins à courbure continue

La discontinuité de la courbure est rapidement devenue une limite à l'utilisation de la méthodologie décrite ci-dessus pour la planification/génération de trajectoires. De ce fait, durant les 15 dernières années, des courbes satisfaisant aux 3 critères suivants ont fait leur apparition dans le cadre de la planification de trajectoires[4] :

1. la courbure de la trajectoire ne doit pas dépasser une valeur maximale prédéfinie,
2. la dérivée de la courbure est bornée par une valeur maximale,
3. la courbure est continue en tout point de la courbe.

Les critères 1 et 2 sont directement liés aux contraintes de non-holonomie du véhicule et à sa cinématique. Effectivement, la courbure est liée à l'angle de braquage des roues, et ce dernier est mécaniquement borné. Par conséquent le véhicule possède un rayon de courbure minimum en dessous duquel il ne pourra suivre la trajectoire imposée.

La dérivée de la courbure reflète, quant à elle, la vitesse de braquage qui est mécaniquement bornée. Finalement, le critère n°3 est relatif à la méthode de planification/génération retenue et assure une trajectoire caractérisée par de faibles variations des consignes de commande (angle de braquage, vitesse de braquage...).

Les travaux initiés dans le domaine de la planification/génération peuvent être classifiés suivant deux catégories : la première regroupe des chemins dont **la courbure est une fonction polynomiale** alors que la deuxième synthétise des techniques dont **les chemins sont définis par des coordonnées polynomiales**. Souvent, ces travaux définissent des trajets respectant des critères comme la minimisation de l'accélération transversale (l'accélération transversale et la courbure étant mathématiquement liées) mais s'écartent de l'idée de départ qui consistait à définir le plus court chemin entre deux configurations. Dans les deux cas, il s'agit toujours de trouver une alternative à l'utilisation d'arcs de cercle pour assurer la jonction entre deux lignes droites avec une continuité de la courbure aux points de jonction.

[3] Au point de jonction entre un segment de droite et un arc de cercle, la courbure passe instantanément d'une valeur nulle à 1/R (R étant le rayon de l'arc de cercle). Ceci se traduit au niveau du véhicule par une vitesse de braquage des roues infinie.

[4] Pour être précis, l'ensemble de ces travaux se réfère à la génération de trajectoires et ne prend pas en compte l'évitement d'obstacles.

3.2.2.1. Chemins à courbure polynomiale

La courbure de ces chemins s'exprime sous la forme d'un polynôme fonction de l'abscisse curviligne s.

$$\kappa = f(s) \tag{3.1}$$

Certains polynômes de différents degrés sont remarquables :

– Premier ordre : la courbure de ce type de courbes, portant le nom de **clothoïdes,** est définie par une fonction linéaire de l'abscisse curviligne [KAN85] : la courbure du chemin augmente le long du trajet et on obtient finalement une courbe en forme de spirale (cf. figure 3.2),

$$k = a_0 + a_1 \cdot s \tag{3.2}$$

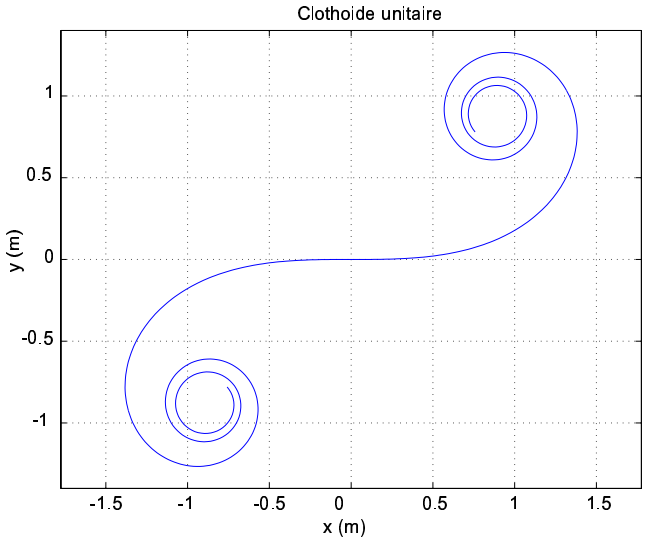


FIG. 3.2. : Exemple de clothoïde

– Troisième ordre : les **spirales cubiques** (cf. figure 3.3) utilisent une fonction quadratique de représentation de la courbure suivant l'abscisse curviligne [NAG01].

$$k = a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 \tag{3.3}$$

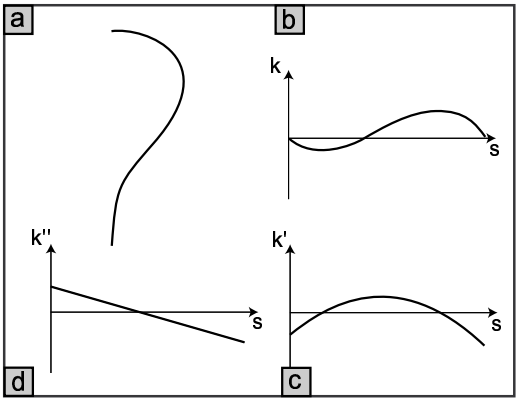


FIG. 3.3. : Une spirale cubique (a), sa courbure (b), les dérivées 1ère (c) et 2nde (d) de la courbure

Le principal avantage de ce type de représentation réside dans la **simplicité de la formulation de la courbure**, rendant le traitement des contraintes cinématiques du robot mobile plus facile [SCH96a]. Par ailleurs, ces représentations ont fait l'objet de la majorité des recherches même si l'inconvénient majeur demeure la difficulté du calcul des coordonnées. Elles ne peuvent être obtenues directement et de manière précise, et nécessitent une intégration numérique. Leur implémentation en temps-réel reste par conséquent délicate.

Pourtant, ces différentes techniques ne satisfont pas l'un des objectifs premiers de la génération/planification de trajectoires pour robots mobiles qui est la détermination du plus court chemin entre deux configurations. Ces courbes s'écartent en effet de l'arc de cercle initial représentant le trajet optimal. C'est pourquoi, récemment, s'inspirant des trajets de "Reeds & Shepp", des chemins sous-optimaux à courbure continue ont été définis. Le couplage des chemins de "Reeds & Shepp" et des clothoïdes assure ainsi la continuité de la courbure le long du trajet. La transition entre les segments de droite (de courbure nulle) et les arcs de cercle (de courbure fixe κ) est assurée par des portions de clothoïdes où la courbure varie linéairement de 0 à κ.

3.2.2.2. Chemins à coordonnées polynomiales

Différents formalismes mathématiques ont été employés pour représenter les coordonnées des chemins sous forme polynomiale :

- ***représentation paramétrique*** de la trajectoire : cette technique a été élaborée pour définir des chemins dont certains points de passage sont imposés (en général 2 ou 3). Le degré du polynôme est fonction du nombre de contraintes imposées en terme de points de passage. On citera en exemple Komoriya et Tanie qui ont employé des B-splines d'ordre 3 (afin de satisfaire à la continuité de la courbure) pour représenter la trajectoire d'un robot mobile à deux roues [KOM89],
- ***représentation polynomiale des coordonnées cartésiennes*** : des polynômes du $5^{\text{ème}}$ ordre (cf. équation (3.4)) ont ainsi été définis pour caractériser des manœuvres d'évitement d'obstacle ou de changment de voie de circulation [NEL89b, TAK89],

$$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5 \tag{3.4}$$

- ***représentation polynomiale des coordonnées polaires*** d'une courbe : afin de proposer une solution assurant une continuité de la courbure pour des chemins proches des trajets de "Reeds & Shepp", Nelson [NEL89b] a proposé d'approximer les arcs de cercles de tels chemins par une courbe définie par un polynôme polaire. Ce dernier possède la faculté d'assurer une courbure nulle aux points de transition (cf. §3.3).

L'expression analytique des coordonnées des points constituant le chemin est un avantage considérable dans l'utilisation et le calcul de ces courbes. Celle-ci garantit effectivement la simplicité et surtout l'exactitude de leur détermination, contrairement aux clothoïdes où les coordonnées sont obtenues par intégration et peuvent souffrir d'imprécision (n'assurant donc pas une transition convenable avec les segments de droite). Néanmoins, dans le cadre de la détermination de trajectoire satisfaisant à une contrainte de courbure maximum (i. e. la prise en compte de la cinématique du robot mobile), des calculs fastidieux de vérification de ladite contrainte sont nécessaires. C'est pourquoi ces différentes solutions n'ont, dans un premier temps, été appliquées qu'à des robots mobiles autres que de type voiture, sans contrainte sur le rayon de braquage. L'application récente aux robots de type véhicule a été effectuée par Pinchard *et al.* [PIN96a]. Ces auteurs ont généralisé les **splines polaires** de Nelson en intégrant des contraintes cinématiques et dynamiques liées au robot (cf. §3.3.4).

Finalement, les splines polaires possèdent une caractéristique importante par rapport aux objectifs de **modélisation de trajectoires** que nous nous sommes fixés : le choix du polynôme et notamment son ordre dépend de contraintes que l'utilisateur impose. Généralement, dans le cadre des robots de type voiture, celui-ci impose plusieurs configurations (points de passage, cap du véhicule et courbure en ces points) afin de définir un polynôme approximant au mieux l'arc de cercle qu'il est destiné à remplacer (cf. §3.3). En agissant sur le nombre ou la valeur des contraintes de continuité imposées, différentes configurations (et formes de chemins) sont envisageables, s'écartant très largement de l'arc de cercle initial. Par conséquent, cet outil est en mesure de modéliser une trajectoire réelle d'un conducteur lorsque les bons indicateurs ont été sélectionnés (points de passage, courbure en ces points...).

3.2.3. Approches retenues

Nous proposons de faire une rapide synthèse des solutions retenues, tant sur un plan technique que stratégique, compte-tenu des objectifs annoncés (cf. §3.1) dans le cadre de NAICC.

Planification ou génération de trajectoires ?

Dans un premier temps, il convient de choisir entre deux stratégies distinctes qui sont le développement d'un générateur ou d'un planificateur de trajectoires. Clairement, la question qui se pose consiste à choisir entre une prise en compte des obstacles lors de la détermination de la trajectoire de référence ou uniquement lors du suivi de celle-ci. La solution retenue à ce stade est la **génération de trajectoires**, les raisons de ce choix étant spécifiées ci-dessous :

1. *Conserver une stratégie de développement homogène* : NAICC est basé sur l'emploi d'un système de localisation, qui, dans sa configuration la plus courante, ne tient pas compte d'éléments extérieurs tels la congestion du trafic ou la présence d'obstacles pour définir l'itinéraire à emprunter. Un tel système se base sur les informations données par le conducteur (lieu de départ et lieu d'arrivée) afin de définir un trajet qui est ensuite dynamiquement réétudié, en fonction des choix de l'utilisateur. Ainsi, dans cette première version, NAICC déterminera le trajet de référence uniquement en fonction des informations fournies par le module de localisation, sans prendre en compte la présence éventuelle d'obstacles ou de véhicules.
2. *Respecter la hiérarchisation des tâches* telle qu'elle a été définie au §1.4.1.1 : l'activité de navigation (choix de l'itinéraire), qui correspond en fait à la génération du trajet de référence, relève d'un des niveaux les plus élevés dans la hiérarchie définie dans le chapitre 1. La détection et la gestion d'obstacles intervenant au cours de la conduite s'opèrent, quant à elles, lors de la tâche de guidage du véhicule. Le choix effectué respecte donc cette structure.
3. Afin de planifier une trajectoire satisfaisant aux contraintes cinématiques du véhicule et évitant les obstacles (qui peuvent eux-même être en mouvement), le système nécessite la connaissance de leur comportement dans un futur proche. Cette connaissance *a priori* n'étant pas systématiquement possible, nous choisissons de mettre en œuvre un dispositif capable de réagir face à un obstacle détecté lors du suivi du trajet généré.

Sélection du modèle mathématique

Le meilleur compromis entre les objectifs spécifiés pour le suivi de trajet et les différentes méthodologies exposées ci-dessus doit être retenu. Ne permettant pas un asservissement efficace du véhicule sur la trajectoire, les courbes comportant une discontinuité dans la courbure sont rapidement écartées.

De même, les chemins dont la courbure est exprimée sous forme polynomiale (clothoïdes, polynômes cubiques...) ne seront pas considérés dans ces travaux du fait de :

- la complexité du calcul des coordonnées des points formant un tel chemin,
- l'imprécision dans l'obtention des coordonnées en raison de leur détermination par intégration numérique, ou d'un manque de précision lors de la détermination du polynôme représentant la courbure [NEL89b],

Finalement, la formulation retenue concerne les **splines polaires**. Dans le paragraphe 3.2.2.2, nous avons mentionné (et nous montrerons dans la section suivante) la possibilité d'approximer un arc de cercle avec un polynôme polaire dès lors que les contraintes de continuité ont été convenablement choisies. Cette capacité à approximer un arc de cercle, ou plus généralement une courbe quelconque nous a tout naturellement conduit à l'idée que les polynômes polaires étaient l'outil approprié pour la modélisation de trajectoire en virage de différents types de conducteurs. Leur **modularité et leur souplesse,** fonction des contraintes imposées, vont permettre de représenter des trajectoires de profils très différents (et donc des conducteurs de profils très différents !).

3.3. Splines polaires

Les splines polaires ont été introduits par Nelson sous la dénomination de "*Single Polar-Polynomial Curves*" (**SPP**) dans le but de fournir une alternative à la génération de trajectoires de courbure discontinue. Les SPP

ont une allure proche des arcs de cercle initialement employés pour la jonction entre deux segments de droite. Elles sont définies, dans un repère lié au centre de l'arc de cercle, par une fonction polynômiale décrivant le rayon en fonction de l'angle.

Nous présentons dans un premier temps, le formalisme initial des SPP tel qu'il a été défini par NELSON. Dans un second temps, différentes généralisations et notamment celle de PINCHARD [PIN96b] sont mentionnées. Dans cette dernière, la prise en compte des contraintes cinématiques et dynamiques des robots de type voiture est décrite.

3.3.1. Notations

Le tableau 3.1 synthétise les notations et symboles de la problématique présentée dans ce chapitre.

Symbole	Désignation	Unités
r	rayon polaire du chemin	m
ϕ	angle polaire	rad
a_i	paramètres du polynôme polaire	
α	angle de la jonction	rad
θ	cap du véhicule	rad
s	abscisse curviligne	m
κ ou $\kappa(t)$	courbure instantanée sur le chemin	m^{-1}
κ_{max}	courbure maximale de la courbe	m^{-1}
κ_j	courbure au point j	
R	rayon de l'arc de cercle de la jonction	m
R_j	rayon de courbure au point j	m
v ou $v(t)$	vitesse instantanée sur le chemin	$m.s^{-1}$
γ_T	accélération transversale	$m.s^{-2}$
$\gamma_{T_{max}}$	accélération transversale maximale	$m.s^{-2}$
R_{min}	Rayon de braquage minimum du véhicule	m

TAB. 3.1.: Symboles relatifs aux polynômes polaires

3.3.2. Repère polaire

Par la suite, **le sens trigonométrique sera considéré comme sens positif de déplacement** : dans un virage à gauche, les angles orientés seront par conséquent positifs. Sur la figure 3.4, R représente le rayon de courbure de l'arc de cercle à approximer par une SPP, α le secteur angulaire de la jonction (i. e. de l'arc de cercle) et ϕ l'angle polaire délimité d'une part par l'axe des abscisses et d'autre part par r, le rayon polaire.

Ce repère est utilisé pour les définitions de l'angle tangentiel θ, de la courbure κ ou encore de la vitesse v données ci-dessous. Devant la littérature abondante sur ce sujet, les démonstrations (qui n'ont que peu d'intérêt dans ce contexte) seront passées sous silence et seules les relations finales sont présentées. Le lecteur interessé par ces calculs pourra se reporter à [HAR97, SMI72].

3.3.2.1. Courbure dans le repère polaire

Dans un repère polaire, on définit l'angle tangentiel par la relation :

$$\theta = \pi/2 \cdot sign(\alpha) + \alpha - \arctan(r'/r) \tag{3.5}$$

$$\text{avec } r' = \frac{dr}{d\phi}$$

La courbure correspond à la dérivée de l'angle tangentiel θ par rapport à l'abscisse curviligne s de l'arc circulaire[5] :

[5]La tangente à un arc de cercle est toujours perpendiculaire au rayon R de l'arc.

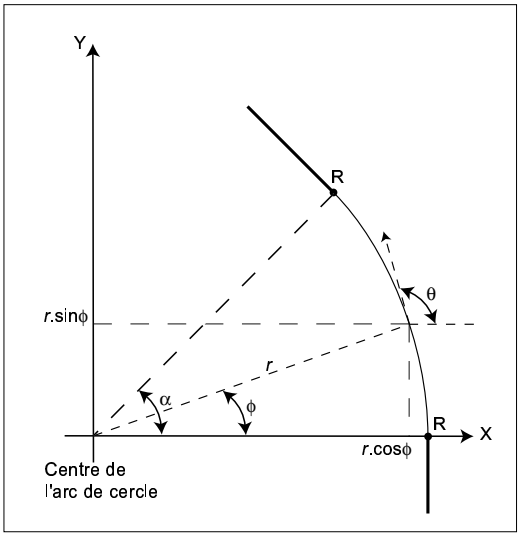


FIG. 3.4. : Repère polaire pour une transition "segment-courbe-segment"

$$k = \frac{d\theta}{ds} = \frac{r^2 + 2r'^2 - rr''}{(r^2 + r'^2)^{3/2}} \cdot sign(\alpha) \tag{3.6}$$

$$\text{avec } r'' = \frac{d^2r}{d\phi^2}$$

La courbure est respectivement positive/négative pour les virages à gauche/droite.

3.3.2.2. Vitesse et accélération dans le repère polaire

L'expression du module de la vitesse linéaire d'un mobile se déplaçant le long d'une courbe définie dans un repère polaire, s'obtient en dérivant l'abscisse curviligne en fonction du temps :

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = \sqrt{(r^2 + r'^2)} \cdot \frac{d\phi}{dt} \tag{3.7}$$

De manière à définir précisément la vitesse d'un mobile, il faut donc connaitre une relation d'évolution temporelle de l'angle polaire ($\phi = f(t)$). En première approche, une fonction linéaire peut être employée en restreignant cependant le champ d'applications à des courbes dont les variations de vitesses restent modérées [PIN96b].

Lors du suivi d'un chemin en courbe, un véhicule est soumis à la force centrifuge définie par la relation (3.8).

$$\begin{aligned} F &= m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot v^2 \cdot \kappa \\ &= m \cdot \gamma_T \end{aligned} \tag{3.8}$$

L'accélération transversale γ_T (ou centrifuge) est donc liée à la courbure du chemin suivi, et est définie par le produit de cette dernière et du carré de la vitesse. La continuité de la courbure représente une caractéristique primordiale pour la génération de chemins puisqu'elle implique une continuité de l'accélération transversale. Nous verrons que ceci reflète directement le comportement de la plupart des conducteurs qui, pour des raisons de sécurité et intrinsèquement de confort, cherchent à minimiser les variations de sollicitations transversales lors de la négociation d'un virage (cf. §3.4.2.3).

3.3.3. Formalisme selon Nelson

3.3.3.1. Expression générale d'un spline polaire

Le principe des splines polaires réside dans la définition d'un polynôme exprimant, dans le repère polaire, le rayon en fonction de l'angle polaire :

$$r(\phi) = a_0 + a_1 \cdot \phi + a_2 \cdot \phi^2 + a_3 \cdot \phi^3 + \ldots + a_n \cdot \phi^n \tag{3.9}$$

Les paramètres a_i sont déterminés en fonction des contraintes de continuité imposées. Le passage des coordonnées polaires aux coordonnées cartésiennes s'effectue aisément en appliquant les relations (3.10) décrites sur la figure 3.4 :

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos\phi \\ y &= r \cdot \sin\phi \end{aligned} \tag{3.10}$$

Cette relation de passage analytique garantit l'obtention d'une jonction parfaite avec les segments de droite dont le spline assure la transition.

3.3.3.2. Conditions de continuité

Afin de définir une transition proche d'un arc de cercle (de rayon R) entre deux segments de droite, les conditions suivantes ont été imposées [NEL89a] :

$$\begin{aligned} \text{pour } \phi = 0 \quad &\Rightarrow \quad r = R,\ r' = 0,\ \kappa = 0 \\ \text{pour } \phi = \alpha \quad &\Rightarrow \quad r = R,\ r' = 0,\ \kappa = 0 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Effectivement, pour que la jonction avec les segments soit parfaite il faut assurer :

1. la **continuité de position** (i. e. d'ordre 0) par rapport à l'arc de cercle initialement utilisé, d'où r=R en début ($\phi = 0$) et en fin ($\phi = \alpha$) de parcours,
2. la **continuité d'orientation** (de cap) du véhicule : la courbe doit être tangente aux segments. Par conséquent la continuité d'ordre 1 s'obtient en imposant une condition nulle sur la dérivée r' du rayon polaire en $\phi = 0$ et $\phi = \alpha$,
3. la **continuité de la courbure** aux points de jonction avec les segments, d'où une contrainte nulle sur la courbure en $\phi = 0$ et $\phi = \alpha$.

On dénombre au total 6 conditions de continuité à satisfaire, ce qui se traduit par un polynôme d'ordre 5. Néanmoins, les contraintes de courbure nulle ramènent la solution à un polynôme polaire d'ordre 4 (le paramètre a_5 étant nul) exprimé par la relation (3.12) :

$$r(\phi) = R(1 + \frac{\phi^2}{2} - \frac{\phi^3}{\alpha} + \frac{\phi^4}{2\alpha^2}) \tag{3.12}$$

où $a_0 = R$, $a_1 = 0$, $a_2 = R/2$, $a_3 = -R/\alpha$, $a_4 = R/2\alpha^2$ et $a_5 = 0$.

3.3.3.3. Remarques

Il est particulièrement intéressant de noter que cette expression ne fait intervenir que des grandeurs relatives à l'arc de cercle à remplacer. En outre, **pour un couple (R, α) donné, il n'existe qu'un seul spline polaire satisfaisant les contraintes imposées**; nous aurons donc l'assurance que la solution analytique obtenue sera unique pour un cas de figure donné [ALT99]. Cette propriété sera par la suite extrêmement importante lors de la modélisation de la trajectoire puisqu'**elle permettra de définir une trajectoire unique en fonction des caractéristiques du profil routier étudié**.

Mais cette relation met également la lumière sur une limitation importante dans son utilisation pour remplacer un arc circulaire : **la précision de l'approximation est inversement proportionnelle au secteur**

angulaire α de l'arc de cercle[6]. Alors qu'une bonne précision peut être obtenue pour des angles inférieurs à 75° [NEL89a, DJA01], elle se dégrade considérablement au delà de cette valeur. La différence de rayon entre un arc circulaire et un spline polaire atteignant près de 8% pour un angle de 90° [NEL89b, HAR97].

3.3.4. Généralisation

Les polynômes polaires introduits par NELSON définissent une trajectoire géométrique sans considération des restrictions liées aux caractéristiques cinématiques et/ou dynamiques du véhicule. La relation (3.12) a été initialement établie dans le but d'assurer une transition régulière entre deux segments de droite. Celle-ci est caractérisée aux points de jonction par des vitesses et des rayons de courbure identiques. Cette même relation a récemment été étendue dans le but d'assurer une précision accrue lors du suivi de la trajectoire générée. Pour ce faire, ALTAFINI a intégré, dans les contraintes de continuité, un critère de minimisation de la distance séparant le mobile de la trajectoire [ALT99].

Par ailleurs, avec l'augmentation des capacités dynamiques des robots autonomes (vitesse de passage plus élevée), cette méthode a été généralisée à des transitions où les vitesses peuvent être différentes. La génération d'un profil de trajectoire respectant les limitations intrinsèques aux robots est donc devenue un aspect primordial à ce stade. De même, la globalisation à des transitions dont les caractéristiques diffèrent de celles énoncées par la relation (3.11) a été le sujet de travaux.

Le lecteur constatera dans cette section que l'extension des splines polaires à des cas de figure plus généraux s'accompagne inexorablement d'un accroissement de la complexité de l'ensemble. Les expressions analytiques des paramètres des polynômes polaires se compliquent rapidement lorsque des contraintes supplémentaires ou différentes de celles énoncées par NELSON sont définies.

3.3.4.1. Intégration de contraintes cinématiques et dynamiques

L'intégration des contraintes cinématiques et dynamiques du robot mobile de type voiture a pour intérêt de totalement définir le déplacement du mobile en fournissant :

- une trajectoire géométrique,
- une loi d'évolution temporelle de l'angle polaire,
- le cap du véhicule durant le chemin,
- la courbure, la vitesse et l'accélération centrifuge.

Pour ce faire, PINCHARD *et al.* [PIN96a] ont défini, en parallèle des contraintes de continuité présentées ci-dessus, une série de conditions que la trajectoire générée doit satisfaire *a posteriori* :

1. le respect des caractéristiques géométriques du robot mobile, et en particulier son rayon de braquage minimum R_{min} imposé,
2. le respect des contraintes cinématiques du robot : vitesse maximale v_{max} autorisée,
3. le respect des contraintes dynamiques du robot : accélération latérale maximale autorisée $\gamma_{T_{max}}$.

Les contraintes exprimées sur le rayon de braquage minimum et sur l'accélération centrifuge maximale admissible se traduisent par une condition sur la courbure maximale de la trajectoire générée :

$$\kappa_{max} = \min \left\{ \frac{1}{R_{min}}; \frac{\gamma_{T_{max}}}{v^2} \right\} \tag{3.13}$$

La relation (3.13) illustre un point particulièrement intéressant pour notre application, où le couplage entre la trajectoire et la vitesse est primordial. Effectivement, **à partir de la trajectoire générée et d'un seuil d'accélération transversale maximal $\gamma_{T_{max}}$ fixé**, nous verrons au chapitre 4 qu'il est aisé de définir la vitesse minimum le long de la trajectoire.

[6] De manière à rester relativement succint sur ce point qui n'est pas capital pour notre application, aucune figure comparative n'a été intégrée. Nous renvoyons le lecteur aux écrits de NELSON, Von der HARDT ou encore DJATH [NEL89a, HAR97, DJA01] qui ont abordé ce cas.

3.3.4.2. Transition à vitesses différentes

La formulation initiale des polynômes polaires ne traite que le cas d'une transition où les rayons (i. e. les vitesses) initial et final sont identiques. Les *"Polynômes Polaires Généralisés"* (**PPG**) ont été développés dans le cas d'une transition où les rayons sont différents. Ces splines sont une adaptation du formalisme de NELSON [PIN96b] : les contraintes de continuité initiale ($\phi = 0$) et finale ($\phi = \alpha$) diffèrent quelque peu de celles de la relation (3.11) puisqu'elles intègrent des continuités en position (donc sur le rayon) non symétriques :

$$\begin{array}{lll} \text{pour } \phi = 0 & \Rightarrow & r = R_0,\ r' = 0,\ \kappa = 0 \\ \text{pour } \phi = \alpha & \Rightarrow & r = R_\alpha,\ r' = 0,\ \kappa = 0 \end{array} \tag{3.14}$$

Le nombre de contraintes demeurant celui du formalisme classique, la structure des PPG est identique à celle des polynômes polaires de NELSON. Le fait de spécifier des rayons différents pour le chemin à générer (cf. figure 3.5) complique sensiblement la résolution. D'une part le degré du polynôme augmente d'un ordre (a_5 n'est plus nul), et d'autre part les rayons R_0 et R_α doivent être déterminés de manière à satisfaire aux conditions de courbure[7] exprimées par la relation (3.13).

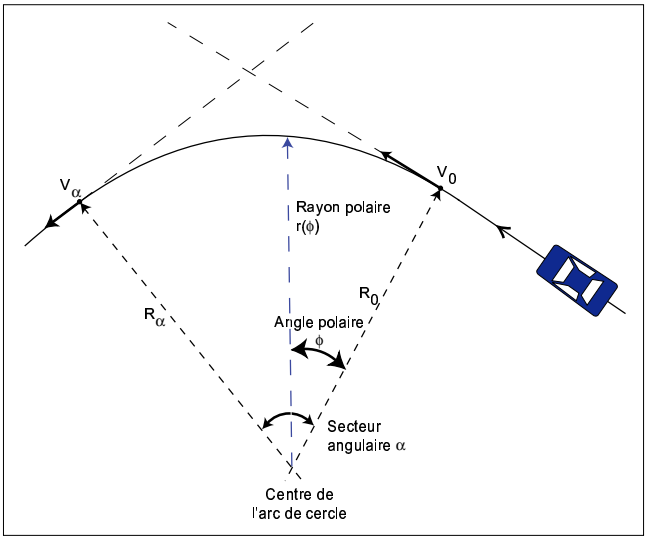


FIG. 3.5. : Transition à vitesses différentes

3.3.4.3. Transition à courbure non nulle

Parallèlement aux courbes SPP classiques, certains générateurs de trajectoires pour robots de type voiture emploient des "*SPP modifiées*" ou M-SPP [DJA01]. Ces dernières assurent une transition continue avec une courbe, dont la courbure est différente de 0 à un point de jonction :

$$\begin{array}{lll} \text{pour } \phi = 0 & \Rightarrow & r = R,\ r' = R'_0,\ \kappa = \kappa_0 \\ \text{pour } \phi = \alpha & \Rightarrow & r = R,\ r' = R'_0,\ \kappa = 0 \end{array} \tag{3.15}$$

Cette modification des contraintes de continuité entraîne un accroissement du degré de complexité qu'il est intéressant de remarquer puisque par la suite, le lecteur verra que pour la modélisation des trajectoires de différents types de conducteurs :

1. les rayons initial et final seront différents (cf. 3.3.4.2),
2. les courbures aux points de jonction seront rarement nulles,

[7] Dans la solution proposée par PINCHARD, les rayons aux points de jonction ne sont pas arrêtés lors du calcul de la trajectoire. Un algorithme se basant sur des valeurs d'initialisation "aléatoires" de ces grandeurs détermine une trajectoire et vérifie si celle-ci satisfait aux contraintes sur la courbure. Si tel n'est pas le cas, les rayons R_0 et R_α sont redimensionnés en utilisant des règles de proportionnalité découlant d'une étude des propriétés des courbes polaires.

3. le cap (i. e. la dérivée du rayon polaire en fonction de l'angle polaire) du véhicule ne sera pas nul.

Ceci laisse entrevoir un degré de complexité élevé ainsi qu'une détermination délicate de l'expression analytique de chaque paramètre a_i (cf. annexe C).

Avec les contraintes exprimées par la relation (3.15), les paramètres d'une courbe M-SPP sont :

$$a_0 = R \tag{3.16}$$

$$a_1 = R'_0 \tag{3.17}$$

$$a_2 = \frac{1}{2R}\left(R^2 + 2R'^2_0 - \kappa_0 \cdot (R^2 + R'^2_0)^{3/2}\right) \tag{3.18}$$

$$a_3 = -\frac{10R'_0}{\alpha^2} - \frac{2a_2}{\alpha} + \frac{\kappa_0}{2R \cdot \alpha} \cdot (R^2 + R'^2_0)^{3/2} \tag{3.19}$$

$$a_4 = \frac{15R'_0}{\alpha^3} + \frac{a_2}{\alpha^2} - \frac{\kappa_0}{R \cdot \alpha^2} \cdot (R^2 + R'^2_0)^{3/2} \tag{3.20}$$

$$a_5 = -\frac{6R'_0}{\alpha^4} + \frac{\kappa_0}{2R \cdot \alpha^3} \cdot (R^2 + R'^2_0)^{3/2} \tag{3.21}$$

Cette première partie du chapitre a permis de décrire l'outil mathématique que nous allons utiliser pour la modélisation de trajectoires. Il convient à présent, pour les deux catégories de conducteur à l'étude, de définir des critères spécifiques permettant de distinguer leur style de conduite. Pour ce faire, nous allons nous appuyer sur **une étude trajectographique dont le but est d'identifier le modèle de trajectoire de chaque conducteur**.

3.4. Le conducteur : étude trajectographique

Il est primordial de noter que l'approche décrite ci-dessous ne considère pas les choix effectués préalablement par le conducteur au niveau de la tâche de navigation. Cette méthodologie s'intègre dans des travaux de **modélisation du comportement dynamique du conducteur**. Ils s'attachent à représenter des manœuvres de conduite particulières par l'intérmédiaire de modèles mathématiques. Reposant sur un environnement extérieur le plus fréquemment fixé *a priori*, ces modèles sont caractérisés par la simplicité de leur structure mais aussi par la limitation de leur domaine de validité à des situations spécifiques : conduite en ligne droite, évitement d'obstacle, suivi d'un véhicule cible...

Le choix de cette stratégie reflète la nécessité de l'identification, ou plutôt faudrait-il parler de la classification, du conducteur afin d'adapter l'aide que l'on souhaite lui prodiguer. Dans le chapitre 1, nous avons largement évoqué les influences que peuvent avoir l'âge, le sexe, les capacités physiques ou mentales du conducteur sur une tâche aussi mobilisatrice que l'activité de conduite. L'observation de cette dernière doit donc, en toute logique, permettre d'aboutir à une caractérisation de l'automobiliste, si tant est que l'on puisse attribuer une vue aussi réductrice à un élément aussi complexe que le comportement humain. En supposant que tel est le cas, quelles sont les situations de conduite les plus appropriées pour cela et quelles sont les grandeurs aisément observables mettant en exergue de tels traits de la personnalité ? Les situations de conduite pertinentes sont bien entendu celles qui vont solliciter tout ou partie des compétences (physiques, mentales,...) du conducteur : La conduite sur autoroute caractérisée par une activité très faible (peu de changements de rapports, vitesse quasi-constante...) n'apportera que peu d'informations en vue de la modélisation du conducteur. De même, si les signaux physiologiques demeurent des indicateurs fiables du niveau de vigilance du conducteur, on leur préfèrera (pour le développement de systèmes embarqués) souvent d'autres relevés moins contraignants pour le conducteur, ne nécessitant pas son équipement.

Les réponses que nous proposons à ces deux interrogations définissent en partie la stratégie des travaux exposés ci-après. La conduite sur routes (à distinguer de celle sur autoroutes) et plus particulièrement les manœuvres de prise de virages sont au centre de cette étude. Les informations retenues sont le **placement du véhicule dans la voie par rapport au profil routier** ainsi que les **sollicitations longitudinales** (phase de freinage et d'accélération, niveaux de vitesse, accélération latérale). L'étude de ces indicateurs aboutit à un modèle de trajectoire en virage propre à une catégorie de conducteurs définie suivant une classification statistique.

3.4.1. "Points objectifs" d'une trajectoire en courbe

L'étude de la trajectoire dans une phase de conduite comme la prise de virage possède de multiples intérêts. Un dynamicien véhicule verra à ce stade une méthode particulièrement intéressante pour l'étude comportementale et la validation des performances dynamiques du véhicule concerné : tester un véhicule en situation critique est en effet monnaie courante tant chez les constructeurs que chez les éditeurs de revues destinées aux acheteurs potentiels. L'ergonome, quant à lui, pourra s'assurer que le conducteur n'éprouve aucune gêne dans la perception des informations nécessaires à la prise de virage (un montant de pare-brise trop large peu être extrêmement pénalisant à ce stade). Enfin, ce type de situations de conduite dans laquelle le conducteur se retrouve très sollicité est riche d'enseignement pour un psychologue dont l'objectif sera de percevoir un peu mieux la démarche du conducteur.

De nombreuses recherches relatives à la perception visuelle du conducteur ont été menées dans le but d'améliorer la connaissance de la stratégie du conducteur. Elles ont notamment eu comme objectif de déterminer d'une part les informations visuelles pertinentes, et d'autre part les traits de caractère de différentes classes de conducteurs (débutants, expérimentés...). Les premiers travaux initiés en ce sens ont concerné l'analyse de la direction du regard, du champ de vision et la quantification de la distance de vision. L'instrumentation du conducteur a permis à Kondo *et al.* [KON68] d'établir avec une relative précision la direction du regard, ainsi que la distance à laquelle regarde un conducteur dans une courbe. En outre, ils ont mis en évidence :

- la proportionnalité de la vitesse et de la distance de vision : plus l'allure du véhicule est soutenue, plus le conducteur (quelque soit sa catégorie d'appartenance) regarde au loin,
- la proportionnalité de la courbure d'un virage et de la distance de vision,
- la direction du regard en courbe : le conducteur ne regarde pas droit devant lui (comme lors de la conduite en ligne droite) mais dans la direction du virage qu'il négocie. Par ailleurs, une asymétrie du regard a été mise en évidence par certains auteurs qui ont établi qu'un conducteur fixe plus souvent à sa droite dans un virage à droite qu'à sa gauche dans un virage à gauche [MOU72].

Ces propriétés ont été confirmées par des travaux postérieurs montrant que les stratégies visuelles en courbe et en ligne droite diffèrent totalement [SHI77, SAV99]. Alors qu'en ligne droite le conducteur se focalise principalement sur la ligne d'horizon (regard au loin, distance de vision importante) pour positionner convenablement son véhicule, la même tâche sera assurée en courbe par une alternance fréquente de coups d'œil d'anticipation (dont le but est de définir la situation à l'avant du véhicule) et de recherche des bords de la route (pour le contrôle latéral du véhicule). En fait, le conducteur alterne entre une **stratégie de détermination de la direction de la route** (projection du regard vers l'avant) et une **stratégie de positionnement du véhicule**. Ces stratégies ont pour intérêt d'évaluer (subjectivement) la vitesse du véhicule, ses position et direction ainsi que la courbure du virage, information prépondérante pour la détermination de la vitesse en virage.

A partir de ces analyses visuelles, les auteurs ont pu constater que le conducteur se focalise sur certaines parties de la route, voire certains points précis. Ces derniers occupent l'activité visuelle pendant environ 90% du temps et sont considérés dans la littérature comme des objectifs que le conducteur cherche à atteindre [AFO93a]. La localisation d'un "point objectif" est fonction de l'expérience du conducteur, de sa connaissance du parcours ou de sa visibilité. Ce point sera la cible qu'il désire atteindre pendant quelques instants et un nouvel objectif sera choisi avant d'avoir atteint le premier. Le fonctionnement par objectifs discrets semble se confirmer au vu de ces explications et corobore par ailleurs parfaitement les expertises menées au laboratoire avec différents essayeurs. Pour ces derniers, il existe des points caractéristiques d'une "bonne trajectoire"[8]. On parlera de "*point de braquage*", "*point de plongée*", "*point de corde*" et finalement de "*point de sortie*" de virage. Ces points définissent les trois phases qui constituent la prise de virage : l'approche et l'entrée de virage, la prise du virage et enfin la sortie de virage [SAV99]. Pour les besoins de notre étude, nous allons considérer que ces points font partie des "points objectifs" fixés par le conducteur.

[8]Suivant les critères de chaque conducteur, cette expression peut prendre différentes significations : pour un pilote, la bonne trajectoire sera celle qui fera gagner du temps alors que pour un conducteur "lambda", ce terme désignera une trajectoire caractérisée par le confort et la sécurité de conduite.

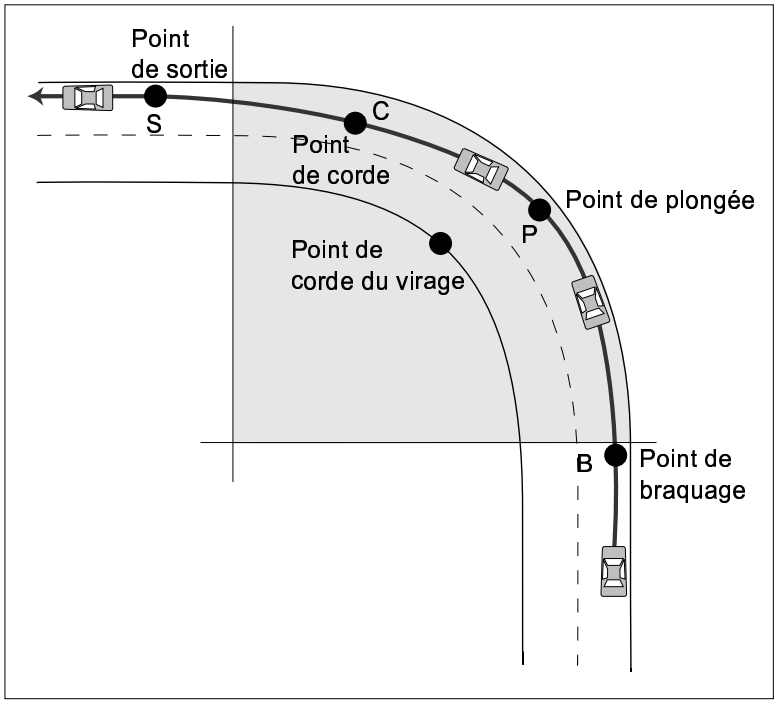


FIG. 3.6. : "Points objectifs" remarquables de la trajectoire en virage

Point de braquage

Le point de braquage (B sur la figure 3.6) est le point de départ de la négociation du virage. Il suit en général une phase de décélération amenant le véhicule à une vitesse adéquate à la courbe. Cette dernière est déterminée après une estimation de la courbure du virage et en fonction de la représentation interne que fait le conducteur des performances de son véhicule. Le point de braquage est caractérisé par la **première consigne au volant** dont le but est de diriger le véhicule dans la direction de la courbe afin de l'aborder dans les meilleures conditions. Il traduit également le niveau d'anticipation du conducteur puisque dans la majorité des cas, le point de première consigne au volant est localisé avant l'entrée effective de la courbe [SAV99].

Point de plongée

Le point de plongée (P sur la figure 3.6) est le signe d'une **grande expérience de conduite** et d'une **conduite incisive**, voire "sportive". Il est l'image d'un conducteur qui est à la recherche d'informations sur la situation de conduite qu'il va aborder dès la sortie du virage. La consigne au volant donnée au point de braquage, et constante jusqu'au point de plongée, a permis de débuter la prise de virage. Néanmoins, jusqu'au point de plongée, le conducteur se situe dans une **phase d'attente** durant laquelle il recherche le maximum d'informations sur le virage mais également sur ce qui va immédiatement suivre. Au point de plongée, il est en mesure d'apercevoir ou d'évaluer la sortie de virage et peut donc effectuer le braquage nécessaire afin de passer la courbe. Il est caractérisé par une **forte variation de l'angle au volant**.

Point de corde[9]

Pour des raisons principalement de confort, un conducteur a tendance à lisser sa trajectoire afin de minimiser les variations brutales d'accélération. Ce phénomène se traduit, sur la trajectoire, par une anticipation du virage et également par une tendance à le "couper", i. e. à se rapprocher de l'intérieur du virage[10]. Le point de la trajectoire **le plus proche de l'accotement intérieur** porte le nom de point de corde (C sur la figure 3.6).

[9] On considère ici le point de corde de la trajectoire et non le point de corde géométrique d'une courbe qui est le point de l'accotement intérieur se trouvant à égale distance de l'entrée et de la sortie du virage.

[10] quite, quelques fois, à empiéter sur la ligne continue...

Point de sortie

Ce point peut être considéré comme étant **l'achèvement de la négociation de la courbe**. A partir du point de corde, le conducteur débraque progressivement (et accélère si le profil de la route après le virage l'autorise) et le véhicule se déporte à nouveau vers l'extérieur afin de minimiser l'effet de la force centrifuge (confort de conduite). Au point de sortie (S sur la figure 3.6), le véhicule est tangent à l'accotement extérieur, le conducteur reprend ses mécanismes de conduite en ligne droite.

3.4.2. Analyse de la trajectoire en courbe

Les automobilistes à l'étude dans ces travaux sont regroupés selon deux classes définies par ROTHENGATTER *et al.* comme étant des conducteurs "inexpérimentés" ou "très expérimentés". Le principe consiste tout d'abord à définir les caractéristiques, principalement en terme de trajectoire, des différentes classes de conducteurs (cf. §3.4.2.3 et §3.4.2.4). Les critères ainsi définis pourront ensuite être utilisés pour l'identification des paramètres du modèle de trajectoires (cf. §3.5), en vue du développement d'un générateur de trajectoires (cf. §3.5.3).

3.4.2.1. Domaine et repère d'étude

Les situations de conduite que nous avons choisies de modéliser (et donc durant lesquelles nous souhaitons à terme assister le conducteur) sont ce que nous appelons communément des virages simples, i. e. une courbe précédée et suivie d'une ligne droite. Seul le relevé de la trajectoire du véhicule en courbe sera pris en considération pour la détermination des indicateurs de comportement du conducteur (le domaine d'étude correspond à la partie grisée sur la figure 3.7). Ainsi, comme l'illustre la figure 3.7, la trajectoire est étudiée dans un repère polaire $(r,\ \phi)$ lié au virage. L'origine du repère se situe au centre de celui-ci et l'évolution de l'angle polaire ϕ couvre l'ensemble du secteur angulaire α du virage.

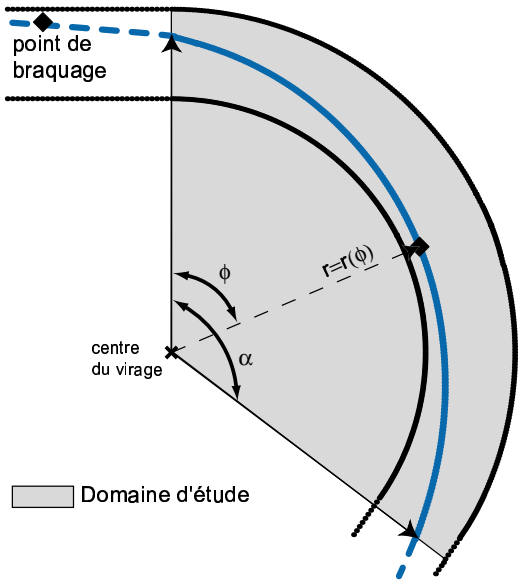


FIG. 3.7. : Domaine d'étude et repère associé

Il est important de noter que le référentiel est lié au profil routier et ce, afin de pouvoir comparer convenablement les trajectoires des différents essayeurs dans un seul et même repère. Néanmoins, cette technique ne permet pas d'étudier l'intégralité de la manœuvre de négociation qui, comme on a pu le voir précédemment, débute souvent avant le virage (sur la figure 3.7, le point de braquage se situe en dehors de la zone d'intérêt). On verra par la suite que les critères établis permettront tout de même de tenir compte de l'anticipation du conducteur. Le choix de lier le repère au profil routier sera primordial puisque nous chercherons à **définir des liens entre la trajectoire d'un essayeur et les caractéristiques topologiques de l'environnement**.

3.4.2.2. Conditions d'expérimentation

Le conducteur réagit à un grand nombre de sollicitations, et il est délicat de prédire son comportement. En outre, son état mental, physique ou psychique, les conditions de conduite (conditions météorologiques, type de véhicule...) et l'ensemble des évènements stochastiques interfèrent sur sa reproductibilité. Les causes du changement comportemental en situation d'essais sont multiples :

- souvent le véhicule d'essais est imposé, et n'est pas celui que la personne a l'habitude de conduire,
- le conducteur peut être géné (physiquement ou mentalement) par l'instrumentation du véhicule,
- s'agissant d'une campagne d'essais, le conducteur peut réagir différemment qu'en conditions de conduite traditionnelles (se sentant surveiller, il sera particulièrement attentif...),
- le parcours est imposé, et le conducteur s'y trouve seul,
- ...

Il convient par conséquent d'être particulièrement rigoureux lors de la mise en œuvre de campagnes d'essais, en définissant un protocole en accord avec les objectifs recherchés. Par ailleurs, lors du "dépouillement" des données, ces critères doivent être considérées afin de ne pas tirer de conclusions atives.

Piste d'essais

La piste de "l'Anneau du Rhin" (figure 3.8), à quelques kilomètres de Mulhouse, a été le centre de l'étude trajectographique. La particularité de ce circuit est que son tracé est une concaténation de virages des différents circuits visités par le championnat du monde de Formule 1. Les essais se sont déroulés avec un véhicule du laboratoire, un Coupé Mégane 2.0 litres disposant d'une instrumentation identique à celle du véhicule destiné au projet NAICC. Seule la partie dite "lente" du circuit, possédant des courbes de configurations intéressantes pour notre étude, a été utilisée.

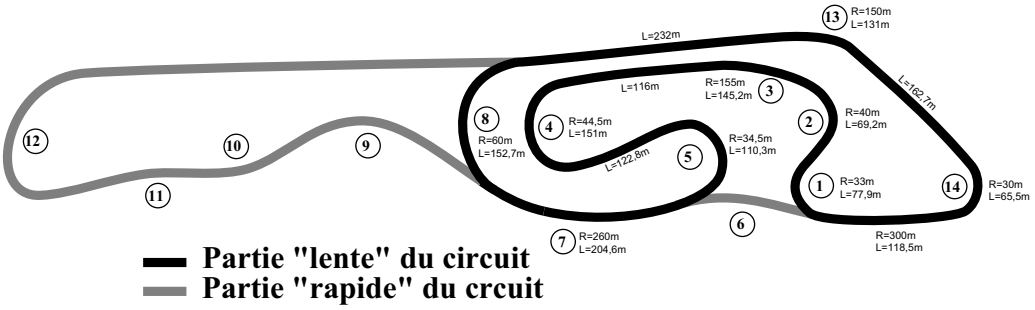


FIG. 3.8. : Circuit "l'Anneau du Rhin" de Biltzheim

Protocole d'essais

Une campagne d'essais axée sur l'étude comportementale (du conducteur ou du véhicule) nécessite la définition et le respect d'un protocole garantissant à la fois l'homogénéité et la reproductibilité des mesures, mais également (et surtout) une sécurité absolue lors des expérimentations. En outre, les points suivants ont été spécifiés durant les essais :

- la trajectoire relevée par un système GPS est celle du centre de gravité du véhicule : l'antenne GPS a été disposée sur le véhicule après identification de son centre d'inertie par pesage (conducteur et copilote compris),
- chaque conducteur dispose de trois tours de piste de "prise en main", de réglage du véhicule et d'adaptation à l'instrumentation : durant cette période, aucune acquisition n'est effectuée,

- les données recueillies sont les informations du GPS (position du véhicule, précision de la mesure GPS...), les signaux de vitesses longitudinale et latérale ainsi que les accélérations linéaires et vitesses de rotation suivant les trois axes de mesure,
- le GPS est utilisé dans son mode différentiel (DGPS, cf. chapitre 6), l'antenne fixe de référence étant placée durant l'ensemble de la campagne au même endroit,
- de part l'utilisation d'une piste d'essais fermée à toute circulation, les conducteurs disposent de la largeur de la piste : des essais préalablement effectués au sein du laboratoire ont montré que les conduites dans une voie de circulation et sur l'ensemble de la piste sont régies par les mêmes règles de placement et de recherche de trajectoires (cf. §3.4.1),
- aucune indication spécifique de conduite n'a été donnée aux conducteurs, en dehors du respect des conditions de sécurité,
- finalement, seuls les virages dont les rayons de courbure sont inférieurs à 150m ont été retenus pour ces travaux. Au delà (virage 7), il devient délicat de caractériser les deux classes de conducteurs, tant leurs trajectoires sont proches.

Hypothèses

A ce stade, deux hypothèses ont été formulées :

1. sur les **conditions d'expérimentation** : elle permet de se découpler du sens de parcours imposé par la direction de piste. En effet, nous supposons que les trajectoires prises par les conducteurs sont indépendantes du sens des virages (droite ou gauche). Le fait que le véhicule ne soit pas symétrique selon l'axe longitudinal et que le siège conducteur se situe à gauche n'altère en rien les performances des essayeurs. Ainsi, il a été possible de considérer de manière semblable des courbes de mêmes caractéristiques (rayon, secteur angulaire, largeur de la piste...) mais de sens différent, ce qui a considérablement augmenté la base de données des situations de conduite,
2. sur l'**évolution de l'angle polaire** : dans l'approche présentée ci-dessous, il sera considéré que la loi horaire sur l'angle polaire ($\phi = f(t)$) est une fonction linéaire ($\phi = a \cdot t$), où le paramètre a est une constante. Ceci signifie que l'angle polaire est équidistribué dans le domaine $[0...\alpha]$.

Classification des essayeurs

Deux catégories de conducteurs ont été définies suivant la classification de ROTTENGATHER, présentée dans le paragraphe 1.4.3.2. L'intérêt, dans un premier temps, consiste à définir un modèle de trajectoire satisfaisant pour deux profils très distincts, afin de montrer la validité du processus. Par la suite, d'autres classes de conducteurs pourront être modélisées de la même manière. Les conducteurs à l'étude durant cette campagne ont fait partie soit de la classe "**inexpérimentés**" soit de la classe "**très expérimentés**".

Nous verrons, en outre, que le conducteur "inexpérimenté" adopte un comportement attentiste et passif alors qu'un conducteur "très expérimenté" a un comportement très actif. Ces traits de caractère correspondent d'ailleurs aux deux stratégies de conduite présentées par SAVKOOR & AUSEJO [SAV99]. Dans le premier cas de figure, l'automobiliste négocie une courbe à sollicitations constantes alors que dans le deuxième cas de figure, vitesse et efforts transversaux varient au cours du trajet.

Les figures 3.9 et 3.11 ci-après présentent respectivement les trajectoires relevées à l'aide du DGPS (cf. 3.9a et 3.11a) et une courbe corrélative du rayon de courbure et de la vitesse en fonction de l'angle polaire (cf. 3.9b et 3.11b). Les diagrammes G-G représentant les sollicitations longitudinales et latérales pour chacune des deux classes sont présentés sur les figures 3.10 et 3.12. L'évolution du rayon de courbure est définie par rapport au centre du virage.

3.4.2.3. Le conducteur "inexpérimenté"

La trajectoire observée lors de ces essais reflète parfaitement le style de conduite d'une grande majorité d'automobilistes : à l'approche d'une courbe, le conducteur tourne progressivement (et linéairement) le volant jusqu'à atteindre une valeur maximale qu'il maintient un certain temps. Puis, il débraque de la même manière

jusqu'à ce que le volant ait rejoint sa position initiale. Cette manière de faire illustre un **intérêt particulier du conducteur pour son confort de conduite** puisque la régularité de cette manœuvre se traduit par une trajectoire lisse et progressive[11], proche d'un arc de cercle et caractérisée par des sollicitations transversales quasi-constantes (cf. 3.10).

Particularités de la trajectoire et de son rayon de courbure

Il est intéressant de noter que la phase de prise de virage a débuté bien avant le domaine d'étude puisque le point de braquage se trouve à environ 15 m du début de la courbe. Ce phénomène se retrouve à l'entrée du virage ($\phi = 0$) où le cap du véhicule est déjà prononcé. La variation de l'angle au volant conduit le véhicule à atteindre un point de corde à mi-chemin du virage et c'est à cet instant que le conducteur va progressivement débraquer pour amorcer la sortie.

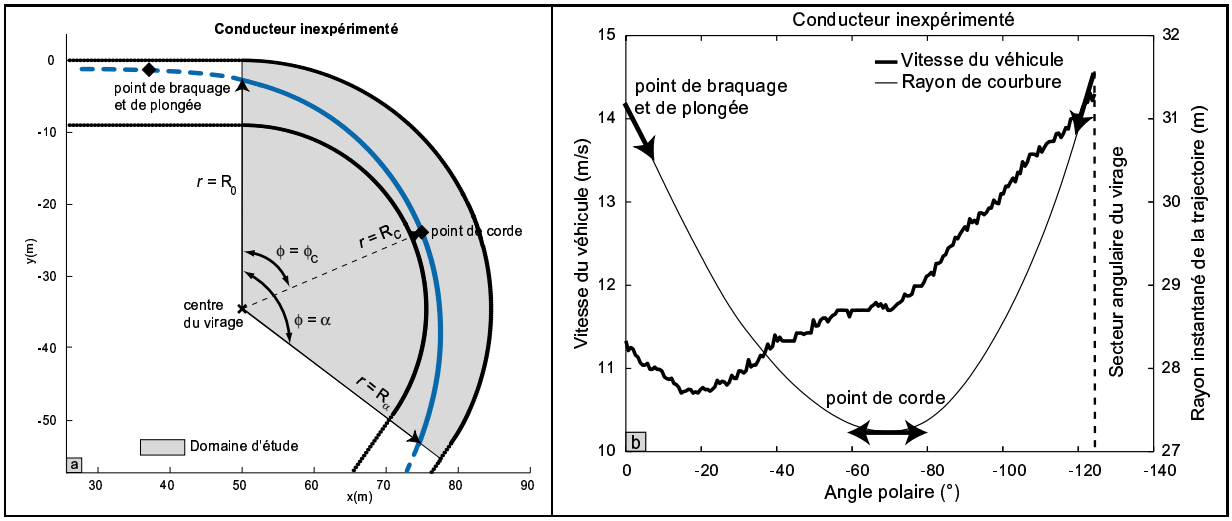


FIG. 3.9. : Trajectoire et rayon de courbure : virage 14

La symétrie de la conduite autour du point de corde est illustrée par la forme parabolique du rayon de courbure de la trajectoire (cf. 3.9b) et par la position de ce point, à mi-chemin du virage (i. e. à la moitié du secteur angulaire[12]). Par ailleurs, les variations du rayon en entrée et en sortie de virage (matérialisées par des flèches sur la figure) montrent que **le conducteur anticipe la négociation**, principalement grâce à la perception visuelle de l'environnement proche [BIL77, DON78, KON68, SHI77]. Du fait de cette anticipation et de la régularité de la manœuvre de braquage, la négociation du virage n'est pas achevée à sa sortie. La position latérale dans la voie (ou sur la piste), donnée par la valeur du rayon instantané, indique par ailleurs que ce conducteur ne profite pas totalement, en entrée ($\phi = 0$) et en sortie ($\phi = \alpha$) de virage, de la liberté que lui donne le protocole d'essais. Il pourrait davantage se rapprocher de l'extérieur de la piste et ainsi augmenter le rayon de courbure de la trajectoire afin de minimiser les efforts transversaux.

Du fait d'un freinage appuyé dans la ligne droite précédent cette courbe, la vitesse en entrée est relativement faible, ce qui autorise le conducteur à accélérer très progressivement durant la négociation.

Sollicitations longitudinales et latérales

Finalement, l'analyse du diagramme des sollicitations présente plusieurs points qu'il convient de relever :

1. la phase de freinage a lieu avant le virage et se poursuit quelque peu durant l'entrée dans celui-ci,
2. le niveau d'accélération transversale est constant durant toute la négociation, augmentant quelque peu avec l'augmentation de la vitesse du véhicule,
3. les sollicitations longitudinales sont symétriques en accélération et en freinage (alors que le potentiel de freinage d'un véhicule est largement supérieur à son potentiel d'accélération).

[11] L'expression "smooth trajectory" est employée en anglais.
[12] très proche du point de corde géométrique du virage.

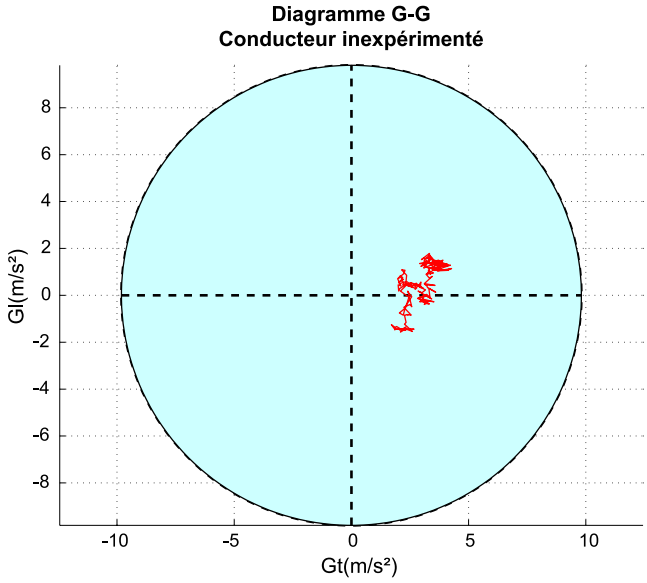


FIG. 3.10. : Diagramme G-G : virage 14

Synthèse

Le conducteur "inexpérimenté" adopte une conduite que l'on pourrait qualifier de "**conduite en régime établi**", avec des sollicitations longitudinale et transversale relativement découplées : le freinage s'effectue presque entièrement avant l'entrée dans la courbe alors que la réaccélération est limitée par les efforts transversaux auxquels est soumis le conducteur. De plus, la conduite est "**progressive**" et guidée par la recherche de sécurité et de confort.

Les observations trajectographiques importantes effectuées ci-dessus sont :

1. l'**anticipation** : se traduit par des **variations du rayon (pentes) non nulles en entrée et sortie de virage**,
2. la symétrie de la trajectoire par rapport au profil du virage : le **point de corde se situe quasiment à mi-chemin entre l'entrée et la sortie de virage**,
3. **les positions quasi-identiques du véhicule en début et fin de courbe** : le rayon de la trajectoire est sensiblement le même dans ces deux situations.

Nous verrons au paragraphe 3.4.3 la manière avec laquelle seront exploitées ces observations afin d'identifier le modèle mathématique de la trajectoire de cette classe de conducteurs.

3.4.2.4. Le conducteur "très expérimenté"

Au vu de la trajectoire relevée pour le conducteur "très expérimenté", il est aisé d'affirmer que celui-ci utilise au maximum la piste mise à sa disposition, la technique de conduite se démarquant totalement de celle du conducteur "inexpérimenté". Le critère de conduite n'est plus ici le confort mais bien l'**efficacité**. On retrouve dans ce style de conduite les "points objectifs" particuliers présentés au paragraphe 3.4.1, y compris le point de plongée P, caractéristique fondamentale d'une **conduite incisive ou sportive**.

Particularités de la trajectoire et de son rayon de courbure

En entrée de virage, i. e. au début de la zone d'étude, le conducteur n'a pas encore débuté le braquage au volant : la phase de freinage est en cours mais, à l'image de la pente du rayon de courbure, le véhicule est toujours parallèle à la ligne droite qui précède. On constate sur le tracé du rayon de courbure que celui-ci tend à croître, c'est-à-dire que le véhicule s'approche davantage de l'accotement extérieur. Le conducteur est à la **recherche d'informations** sur la phase de conduite imminente (le virage) et également sur ce qui va suivre, afin

de définir la trajectoire appropriée. Il semble par conséquent que la trajectoire en courbe de cette catégorie de conducteurs ne dépende pas uniquement du virage à proprement parlé mais également de la topologie suivant le virage. Contrairement au conducteur "inexpérimenté", plutôt passif car il découvre à tout moment sa trajectoire, le conducteur "très expérimenté" semble la chercher activement.

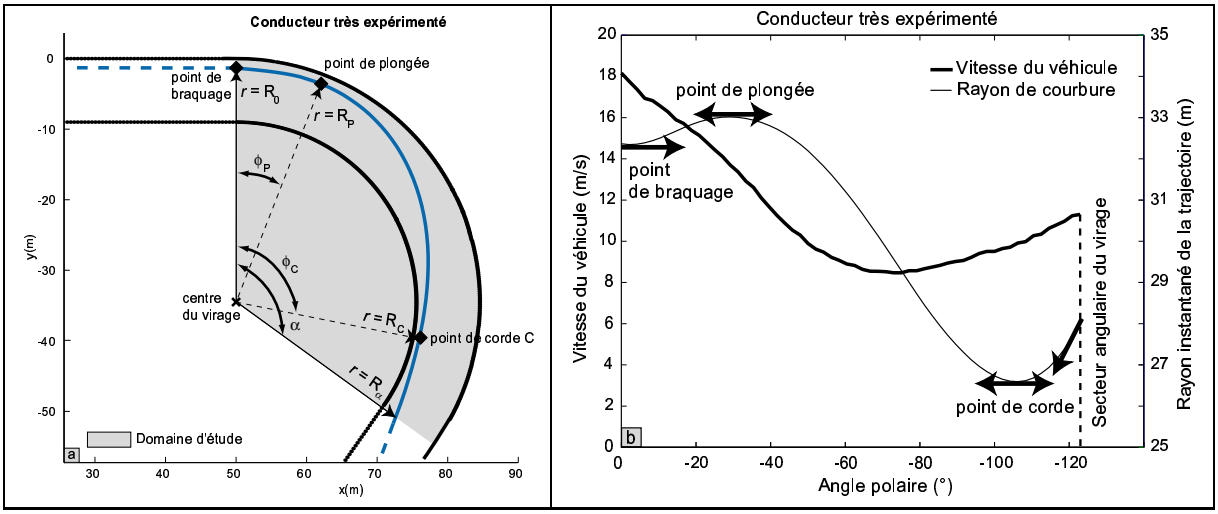


FIG. 3.11. : Trajectoire et rayon de courbure : virage 14

Placé le long de l'accotement extérieur, il parvient à voir, sinon à évaluer, la sortie du virage au point de plongée P (valeur maximale du rayon $r = R_P$ pour $\phi = \phi_P$). Il peut donc définir l'emplacement de son point de corde C, en prenant en considération l'ensemble des informations qu'il a pu acquérir entre l'entrée de virage ($\phi = 0$) et le point de plongée. Cette phase de prise d'informations, dénommée **"zone d'attente"** [LAU03], s'accompagne d'un freinage soutenu ($\gamma_L = -4$ m/s^2) jusqu'à la moitié du virage. Du fait de cette **entrée tardive dans la courbe**, le point de corde se trouve "rejeté vers la sortie du virage". Ceci signifie que le conducteur atteindra la sortie en étant proche de l'accotement intérieur et disposera de toute la largeur de la piste pour aborder la situation suivante. De ce fait, et grâce au cap du véhicule en sortie de courbe, le conducteur se trouve très tôt dans une configuration idéale pour réaccélérer et "attaquer" la phase de conduite suivante.

Sollicitations longitudinales et latérales

Il est particulièrement intéressant de relever que, **jusqu'au point de plongée, le véhicule n'est soumis à aucune sollicitation latérale** et que le freinage s'opère donc très sainement en ligne droite. Par ailleurs, la **trajectoire rectiligne aux environs du point de corde** permet une réaccélération particulièrement précoce, dès le milieu du virage. Notons toutefois que, dans ce cas de figure, la vitesse de sortie est inférieure à la vitesse d'entrée en courbe. Cela s'explique par le fait que ce virage est précédé d'une longue ligne droite que le conducteur "très expérimenté" exploite au maximum.

Enfin, cette technique de conduite sollicite raisonnablement le véhicule si l'on observe les niveaux d'accélération transversale atteints : moins d'1/2 g. Le conducteur dispose ainsi d'une réserve de potentiel qu'il ne met pas à profit dans ce cas, si l'on en croit le niveau d'accélération longitudinale (2 m/s^2). En outre, le couplage entre les efforts longitudinaux et latéraux durant le braquage pour rejoindre le point de corde est typique de ce style de conduite.

Synthèse

Cette stratégie de conduite qui consiste à "attendre pour voir" s'oppose à celle du conducteur "inexpérimenté" qui lui, débute sa manœuvre sans connaissance du profil suivant le virage. Elle est notamment caractérisée par :

1. une **entrée de virage parallèle à l'accotement extérieur** et **proche** de ce dernier,
2. une **phase d'attente** durant laquelle le véhicule se rapproche davantage de l'extérieur jusqu'au **point de plongée, caractérisé par la valeur maximale du rayon**,

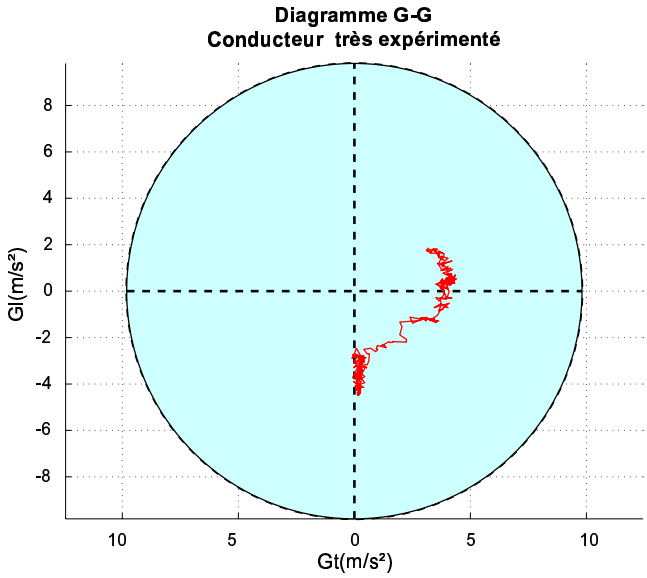


FIG. 3.12. : Diagramme G-G : virage 14

3. un point de corde tardif,
4. une **sortie de virage proche de l'accotement intérieur** (le rayon au point de sortie étant à peine différent de celui du point de corde) accompagnée d'une réaccélération précoce du fait que **le véhicule (i. e. son cap) se trouve dans la direction de la situation de conduite suivante**.

3.4.2.5. Remarques

Fort des analyses comportementales de deux classes de conducteurs bien distinctes, nous sommes à présent en mesure de définir les particularités de leurs trajectoires respectives. En outre, la relative passivité d'un conducteur "inexpérimenté", attendant patiemment la fin du virage pour se rendre compte de la situation qu'il va avoir à affronter, s'oppose totalement à la conduite incisive du conducteur "très expérimenté", à l'affût d'informations concernant son environnement d'évolution.

La représentation de la trajectoire, sous forme d'un rayon fonction de l'évolution angulaire du virage, a rendu possible la détermination de points caractéristiques de chaque style de conduite (cf. §3.4.2.3 et §3.4.2.4). Ceux-ci s'appuient sur la notion de "points objectifs" introduite dans cette section (cf. §3.4.1) et confirment le fait que le conducteur, durant la phase de négociation, se définit des points de référence à atteindre et détermine les consignes en conséquence.

Enfin, de manière à définir un modèle de trajectoires qui convienne aux deux classes de conducteurs, il est impératif que ces points et leurs caractéristiques respectives (position, pente et courbure) constituent les conditions à imposer pour la détermination de l'expression analytique du spline polaire.

3.4.3. Identification du modèle

Dans la section précédente a été présentée une partie des résultats obtenus lors de l'étude comportementale du conducteur. Même si l'analyse trajectographique exposée ne présente que l'unique cas de figure du virage 14, celle-ci a été menée sur l'ensemble des portions significatives du tracé de Biltzheim. Ainsi, nous nous sommes assuré de la pertinence des critères retenus et de fait, de la structure du modèle employé. Une première approche, qui ne considérait pas les contraintes sur la courbure a été développée [LAU00a], mais celle-ci a très rapidement montré ses limites dans la modélisation de trajectoires et notamment dans le cas du conducteur "inexpérimenté". En effet, compte-tenu des courbes présentées ci-dessus, il apparaît clairement que la courbure de la trajectoire au début et en fin de négociation n'est pas nulle comme cela a été considéré dans ces travaux. Néanmoins, cette représentation reste d'un grand intérêt, d'une part du fait de la simplicité des expressions des paramètres du

spline polaire (et donc de la rapidité de calcul), et d'autre part du fait de sa validité dans des virages très ouverts (fort rayon de courbure conjugué à un faible secteur angulaire) où le conducteur n'a pas besoin d'anticiper (sous hypothèse de visibilité convenable).

Cette section vise, dans un premier temps à présenter la manière dont les constatations sur les différents comportements sont prises en compte dans l'identification du modèle. Dans un deuxième temps, nous illustrons la démarche originale consistant à déterminer les paramètres du spline polaire en fonction des données relatives au profil routier, c'est-à-dire les caractéristiques des virages.

La formulation des polynômes polaires se base sur la définition d'un certain nombre de contraintes de continuité. En outre, les informations visuelles sont utilisées par l'automobiliste dans le but d'identifier subjectivement la courbure de la route, la position ou encore le cap du véhicule [SAV99, AFO93b]. Il apparait inévitable d'utiliser des critères relatifs à ces grandeurs pour définir le modèle de trajectoire approprié. C'est pourquoi, les contraintes de continuité imposées sont des conditions sur la position du véhicule, sa direction (ou son cap) et enfin la courbure du chemin pour les "points objectifs" particuliers (points de plongée et de corde) identifiés dans les deux situations.

Nous proposons de définir ces conditions en fonction des caractéristiques relevées pour les conducteurs "inexpérimentés" et "très expérimentés", synthétisées aux §3.4.2.3 et §3.4.2.4.

Le conducteur "inexpérimenté"

Le but est de superposer une formulation mathématique aux trois critères mentionnés dans la synthèse de l'étude trajectographique (cf. §3.4.2.3) :

- l'***anticipation*** : signifie qu'en entrée de virage, le véhicule est dirigé dans le sens du virage et que la trajectoire n'est plus rectiligne : pour $\phi = 0$, $r' = r'_0$ et $\kappa = \kappa_0$; cette anticipation entraine une sortie de virage où la manœuvre de négociation n'est pas achevée (le conducteur n'a pas terminé sa phase de débraquage) : pour $\phi = \alpha$, $r' = r'_\alpha$ et $\kappa = \kappa_\alpha$,
- la ***symétrie de la trajectoire en fonction du point de corde*** : il convient donc de convenablement localiser ce point : pour $\phi = \phi_C$, $r = R_C$ et $r' = r'_C$ (par définition, la courbure est continue le long du trajet, d'où l'absence de cette condition),
- les ***positions quasi-identiques en entrée et en sortie de courbe*** : pour $\phi = 0$, $r = R_0$ et pour $\phi = \alpha$, $r = R_\alpha$.

En reprenant les travaux de PINCHARD utilisant 3 conditions respectivement en entrée et en sortie de courbe, il convient d'en ajouter 2 illustrant la symétrie de la trajectoire au point de corde. On obtient au total 8 conditions de continuité (cf. équation (3.22)), ce qui se traduit finalement par un polynôme d'ordre 7, défini par la relation (3.23).

$$\begin{array}{lcl} \text{pour } \phi = 0 & \Rightarrow & r = R_0,\ r' = r'_0,\ \kappa = \kappa_0 \\ \text{pour } \phi = \phi_C & \Rightarrow & r = R_C,\ r' = r'_C \\ \text{pour } \phi = \alpha & \Rightarrow & r = R_\alpha,\ r' = r'_\alpha,\ \kappa = \kappa_\alpha \end{array} \tag{3.22}$$

$$r(\phi) = a_0 + a_1 \cdot \phi + a_2 \cdot \phi^2 + a_3 \cdot \phi^3 + \ldots + a_7 \cdot \phi^7 \tag{3.23}$$

Les paramètres a_0 à a_7 sont déterminés par résolution formelle d'un système de 8 équations à 8 inconnues défini par les contraintes du système (3.22). **Ces paramètres sont tous fonctions des indicateurs (R_0, R_α, R_C, r'_0, r'_α, r'_C, κ_0 et κ_α)** spécifiés par les contraintes de continuité imposées, **ainsi que des valeurs particulières de l'angle polaire pour $\phi = \phi_C$ et $\phi = \alpha$**. Pour des raisons de lisibilité du document, ils ne sont pas présentés ici. En effet, l'ordre élevé de l'expression du rayon et de ce fait de la courbure (numérateur d'ordre 14 et dénominateur d'ordre 21 !!) est à l'origine de la complexité des expressions analytiques des paramètres. Le lecteur intéressé par la démarche pourra se reporter à l'annexe C.

Le conducteur "très expérimenté"

Une démarche analogue appliquée à la catégorie des conducteurs "très expérimentés" conduit à un polynôme d'ordre 9 satisfaisant les 10 conditions illustrées ci-après (relations (3.24)). Ces contraintes supplémentaires

caractérisent la zone d'attente durant laquelle le conducteur définit sa trajectoire.

$$\begin{array}{lcl} \text{pour } \phi = 0 & \Rightarrow & r = R_0,\ r' = r'_0,\ \kappa = \kappa_0 \\ \text{pour } \phi = \phi_P & \Rightarrow & r = R_P,\ r' = r'_P \\ \text{pour } \phi = \phi_C & \Rightarrow & r = R_C,\ r' = r'_C \\ \text{pour } \phi = \alpha & \Rightarrow & r = R_\alpha,\ r' = r'_\alpha,\ \kappa = \kappa_\alpha \end{array} \tag{3.24}$$

En plus des indicateurs mentionnés dans le paragraphe précédent, les paramètres a_0 à a_9 qui définissent le modèle du conducteur "très expérimenté" tiennent également compte des particularités de la trajectoire au point de plongée ($\phi = \phi_P$).

Les modèles et les expressions formelles des paramètres étant définies, il convient à présent d'identifier les indicateurs intervenant dans leur définition. Pour ce faire, la première étape va consister, pour un profil routier et une catégorie de conducteurs donnés, à calculer les indicateurs comportementaux définis lors de la caractérisation trajectographique.

3.5. Identification du modèle polaire

3.5.1. Indicateurs du comportement conducteur et environnement

Les contraintes (3.22) et (3.24) caractérisant respectivement le conducteur de type "inexpérimenté" et de type "très expérimenté" déterminent un modèle dont les paramètres sont fonction des indicateurs comportementaux (R_0, R_α, R_C, R_P, r'_0, r'_α, r'_C, r'_P, κ_0, κ_α, ϕ_C, ϕ_P et α). Nous avons eu l'occasion de voir que ces valeurs sont **propres à un conducteur**. En outre, à iso-conditions de conduite (véhicule, parcours, protocoles... identiques), les trajectoires et les sollicitations observées sont complètement différentes et bien entendu en relation avec le profil du conducteur. Pourtant, celui-ci utilise, pour définir la trajectoire adéquate, des informations (visuelles, kinésthésiques...) en grande partie prélevées dans son environnement d'évolution. Bon nombre d'auteurs ont d'ailleurs mis en exergue que l'information prépondérante utilisée par l'automobiliste pour le positionnement latéral du véhicule en courbe était la courbure du virage.

Dès lors, **si ces indicateurs sont propres à une catégorie de conducteurs, ils sont également dépendants de l'environnement**, c'est-à-dire des caractéristiques du profil routier. La démarche choisie consiste donc, à partir des mesures effectuées pour chaque catégorie de conducteurs, à identifier les indicateurs en fonction des caractéristiques du profil routier (cf. figure 3.13). Ces données étant fournies par la base de données cartographique de NAICC, le système d'assistance est donc en mesure, connaissant le profil du conducteur, d'identifier les "points objectifs" de sa trajectoire, les paramètres du modèle polaire et finalement **une trajectoire qui a l'avantage considérable d'être unique pour le profil routier étudié**. Cette unicité du modèle est le résultat de la quantification objective des indicateurs en fonction des paramètres de la situation de conduite (rayon de courbure, secteur angulaire...).

La difficulté réside dans l'identification des critères géographiques sur lesquels se focalise le conducteur, et leurs rôles respectifs dans le jugement de la situation de conduite. Comment est évaluée la criticité de la phase de conduite par l'automobiliste ? La courbure à elle seule ne permet pas toujours de fournir de réponse à des questions que se pose de manière inconsciente le conducteur : est-ce que le virage est serré (i. e. est-ce que le rayon est grand ?), ouvert (i. e. est-ce que le secteur angulaire est faible ?), large, dangereux (présence de gravillons, mauvais devers, etc...)... ?

Dans l'approche présentée ci-après, nous considérons le couplet (R, α) pour la détermination des indicateurs comportementaux. Ce choix se justifie par plusieurs critères :

1. le rayon de courbure est une information primordiale dans l'analyse de la situation de prise de virage et dans la détermination et le déclenchement des actions de commande,
2. n'utiliser qu'une seule grandeur des deux pré-citées est insuffisant [LAU00a, LAU03] : prenons l'exemple de deux courbes de même rayon mais de secteur angulaire différent, i. e. une épingle et un virage très ouvert où la sortie est visible dès l'entrée. Un conducteur "très expérimenté" ne se comporte pas de la même manière dans les deux cas, puisqu'il n'a pas besoin de se déporter vers l'extérieur afin d'apercevoir la sortie ; la phase d'attente caractérisée par le point de plongée n'est pas utile et la trajectoire se rapproche de celle du conducteur "inexpérimenté",

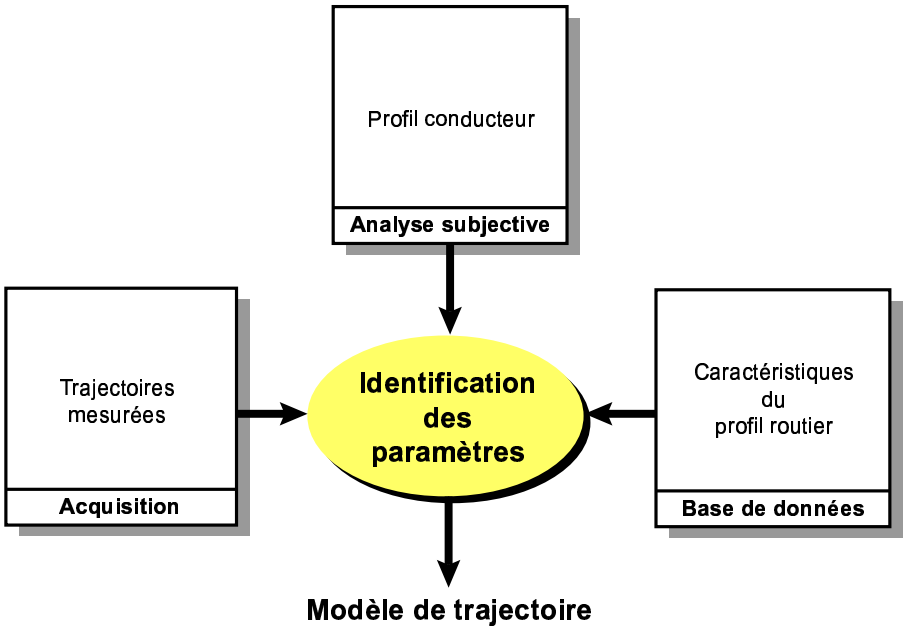


FIG. 3.13. : Procédé d'identification du modèle

3. ces informations sont contenues dans la description topographique du système d'aide à la conduite NAICC.

L'objectif consiste à présent en la quantification objective de ces indicateurs à partir des informations de rayon de courbure et de secteur angulaire du virage à négocier. Une méthodologie architecturée selon deux étapes est proposée : dans un premier temps, on s'attache à définir les caractéristiques des "points objectifs" types d'une classe de conducteurs (point de corde et éventuellement de plongée) avant de les utiliser dans la détermination des points de jonction, en entrée et sortie de courbe.

3.5.2. Quantification objective des indicateurs du comportement conducteur

Le travail présenté ci-après s'inspire très largement du caractère anticipatif des manœuvres effectuées par le conducteur et de la notion de "points objectifs". Effectivement, contrairement au séquencement temporel d'une phase de prise de virage (où l'entrée est logiquement considérée avant la corde et la sortie), nous avons choisi d'abord d'identifier les "points objectifs" du conducteur, i. e. les points de plongée et de corde (cf. §3.5.2.1). Dans un deuxième temps, on s'attache à la définition des phases d'entrée et de sortie de virage (cf. §3.5.2.3). Les nombreuses analyses de stratégies comportementales effectuées à ce sujet depuis les années 70 affirment en effet que la négociation d'une courbe est conditionnée par les informations percues déjà avant celle-ci, et que le conducteur agit en fonction d'objectifs (en terme de vitesse, position, cap et sollicitations latérales) qu'il se détermine. Par conséquent, la recherche d'un objectif à atteindre dans la courbe conditionne en partie le choix de la configuration (position ,cap...) du véhicule au début du virage. De même, lorsque cet objectif initial est atteint (voire même avant), un nouvel objectif (par exemple le point de sortie de virage) est déterminé en fonction de la configuration actuelle du véhicule. Dès lors, la démarche proposée semble correspondre à la stratégie du conducteur dans cette phase spécifique de la conduite.

Dans le cadre de la détermination des "points objectifs", il s'agit d'identifier leurs coordonnées polaires (ϕ_C, R_C) et (ϕ_P, R_P) en fonction du rayon du virage R et du secteur angulaire α. En outre, le principe réside dans l'identification de la position angulaire et latérale[13] du véhicule en ces points particuliers, en fonction des caractéristiques du profil routier. Nous verrons que la position angulaire est principalement dictée par l'ouverture (i. e. le secteur angulaire) de la courbe alors que l'estimation de la position du véhicule dans la voie demeure plus complexe. Les indicateurs relatifs à la variation du rayon (r'_C et r'_P) sont, quant à eux, implicitement déterminés

[13] l'angle polaire au point de corde et de plongée étant l'image de la position angulaire alors que le rayon est l'image de la position latérale du véhicule dans la voie.

de part la nature des "points objectifs" : les points de plongée et de corde étant des extrémums du rayon polaire, **la pente en ces points est nulle** (cf. figures 3.9b et 3.11b).

$$r'_C = r'_P = 0 \tag{3.25}$$

Les phases d'entrée et de sortie de courbe sont caractérisées à l'aide d'un système d'inférence flou. La logique floue est en effet particulièrement adaptée pour représenter des systèmes non-linéaires faisant appel à l'expérience de l'opérateur humain.

La qualité de la modélisation de la trajectoire finale est principalement liée à la précision d'identification des contraintes de continuité. C'est pourquoi il convient d'accorder un intérêt particulier à cette étape et plus précisément à l'estimation de la position latérale du véhicule dans la voie. En plus des essais effectués sur le circuit de Biltzheim, différentes campagnes d'essais sur des profils routiers de caractéristiques très différentes (en terme de rayons de courbure et de secteurs angulaires des virages) ont donc été prises en compte afin de permettre une globalisation de la méthode. Cette démarche a notamment permis de définir l'influence de ces grandeurs sur le choix des "points objectifs" de la trajectoire.

3.5.2.1. Identification de la position angulaire des "points objectifs"

Les études déjà mentionnées dans ce manuscrit ont notamment mis en évidence les modifications stratégiques du conducteur suivant son champ de vision et sa distance de vision. En courbe, le champ et la distance de vision sont très largement dépendants du secteur angulaire du virage : globalement, plus le virage est serré (secteur angulaire élevé), plus le point de fixation du conducteur sera proche du véhicule et le nombre de "points objectifs" sera élevé. Dès lors, on peut s'attendre à ce que **le secteur angulaire conditionne fortement la position angulaire des points de plongée et de corde** des différents types de conducteurs analysés.

La technique de conduite du conducteur "inexpérimenté" (cf. §3.4.2.3) le conduit systématiquement à atteindre un point de corde se trouvant à mi-chemin du virage négocié, c'est-à-dire à la moitié du secteur angulaire. De même, dans l'ensemble des courbes étudiées, il s'est avéré que la position angulaire des points de plongée et de corde d'un conducteur "très expérimenté" est une fonction affine du secteur angulaire ce qui se traduit par la relation (3.26) :

$$\begin{array}{rcl} \phi_C & = & a \cdot \alpha \\ \phi_P & = & b \cdot \alpha \end{array} \tag{3.26}$$

3.5.2.2. Identification de la position latérale des "points objectifs"

Le rayon de courbure de la trajectoire aux points de plongée et de corde est un indicateur de la position latérale du véhicule dans la voie. Comme on a pu le voir, cette donnée est extrèmement importante dans l'étude du conducteur.

Caractérisation linéaire

Dans une première approche essentiellement basée sur la campagne de Biltzheim, seul le rayon de courbure du parcours a été pris en compte pour définir une relation de linéarité entre les indicateurs comportementaux et celui-ci. Si cette méthode est valable pour la définition de la courbure et de la pente aux points de jonction (cf. §3.5.2.4), elle est insuffisante pour la détermination de la position latérale dans la voie.

La figure 3.14 illustre les résultats obtenus lors de l'identification du point de corde en fonction du rayon (**et implicitement de la largeur de la voie**, constante dans l'ensemble des essais).

Sur cette figure est représentée la distance séparant le point de corde du centre du virage en fonction du rayon de courbure du virage. Cette distance dépend également du secteur angulaire du virage : pour un rayon donné, plusieurs configurations allant de 30° à 200° ont été étudiées. Pour chaque configuration (R, α), la position mesurée est représentée par un cercle. De fait, pour une valeur finie du rayon, on remarque des variations de la position du point de corde pouvant atteindre quelques mètres, suivant l'évolution du secteur angulaire. N'utiliser que l'information de rayon revient alors à définir latéralement un unique point de passage du véhicule quelque soit le secteur angulaire du virage. Or, il est à présent reconnu que, lorsque le conducteur à un champ de vision

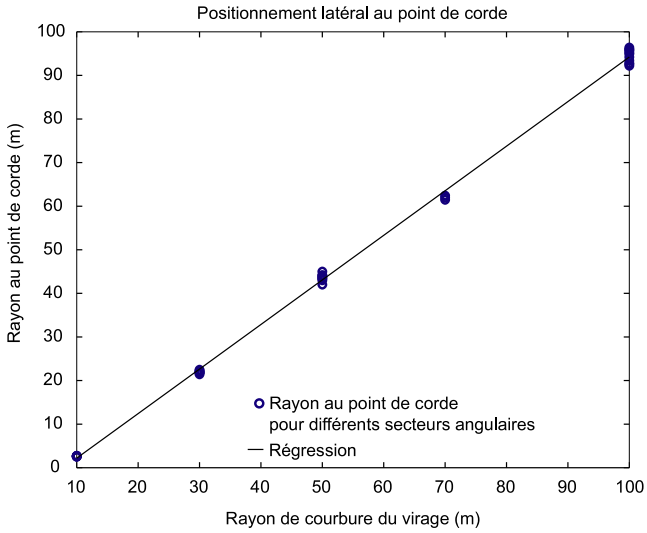


FIG. 3.14. : Rayon au point de corde en fonction du rayon du virage

suffisant pour apercevoir la sortie de la courbe dès son entrée, le déplacement latéral du véhicule dans la voie sera faible (pas de recherche d'un éventuel point de plongée). A contrario, pour des secteurs angulaires importants, il va utiliser au maximum la largeur de voie dont il dispose afin d'atténuer les sollicitations transversales.

Dès lors, cette méthodologie est insuffisante et **il est nécessaire de prendre en compte l'information de secteur angulaire dans la détermination de la position latérale du véhicule dans la voie**.

Caractérisation non-linéaire

Dans [MES99], MESSAOUDENE propose de définir l'évolution des positions latérales des points de plongée et de corde par l'intermédiaire d'un **modèle de représentation** identifié en utilisant le critère des moindres carrés. La méthode itérative utilisée pour la sélection de la structure du modèle aboutit à une solution illustrant la non-linéarité du système par un polynôme où le rayon et le secteur angulaire apparaissent à un ordre 4 (3.27).

$$R_{C,P} = A_0 + \sum_{i=1}^{4} A_i \cdot R^i + \sum_{i=1}^{4} B_i \cdot \alpha^i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{\substack{j=2 \\ i=2}} A_{ij} \cdot R^i \cdot \alpha^j \tag{3.27}$$

La figure 3.15a illustre, pour un conducteur "inexpérimenté" et pour des rayons donnés, l'influence du secteur angulaire d'une courbe sur la position latérale du véhicule au point de corde. De manière à convenablement matérialiser les variations latérales du véhicule dans la voie, l'ordonnée représente l'écart entre le point de corde de la trajectoire et la ligne médiane de la route. Une valeur négative/positive de ce critère indique respectivement que le véhicule se trouve sur la voie intérieure/extérieure par rapport au virage.

Plusieurs conclusions peuvent être établies sur la base de cette illustration :

- **l'influence du secteur angulaire est minime pour des rayons de courbure faibles** (inférieurs à 50 m) : le véhicule se trouvant constamment au milieu de la voie intérieure,
- pour des virages dont le rayon est supérieur à 50 m : **le conducteur a tendance à se rapprocher de l'accotement intérieur avec l'augmentation du secteur angulaire**. Alors qu'il se trouve proche du milieu de la piste pour des virages très ouverts ($\alpha \leq 75°$), il finit à 1 m de l'accotement intérieur dans le cas de la négociation d'un demi-tour,
- **la validité du modèle de représentation** du point de corde porte sur l'ensemble du domaine d'étude ($10 \text{ m} \leq R \leq 100 \text{ m}$ et $30 \leq \alpha \leq 200°$).

Les résultats obtenus par le modèle de la relation (3.27) sont détaillés sur la figure 3.15b pour des courbes de rayons de 50 et 100 m. Si globalement la tendance est effectivement décroissante avec l'augmentation du

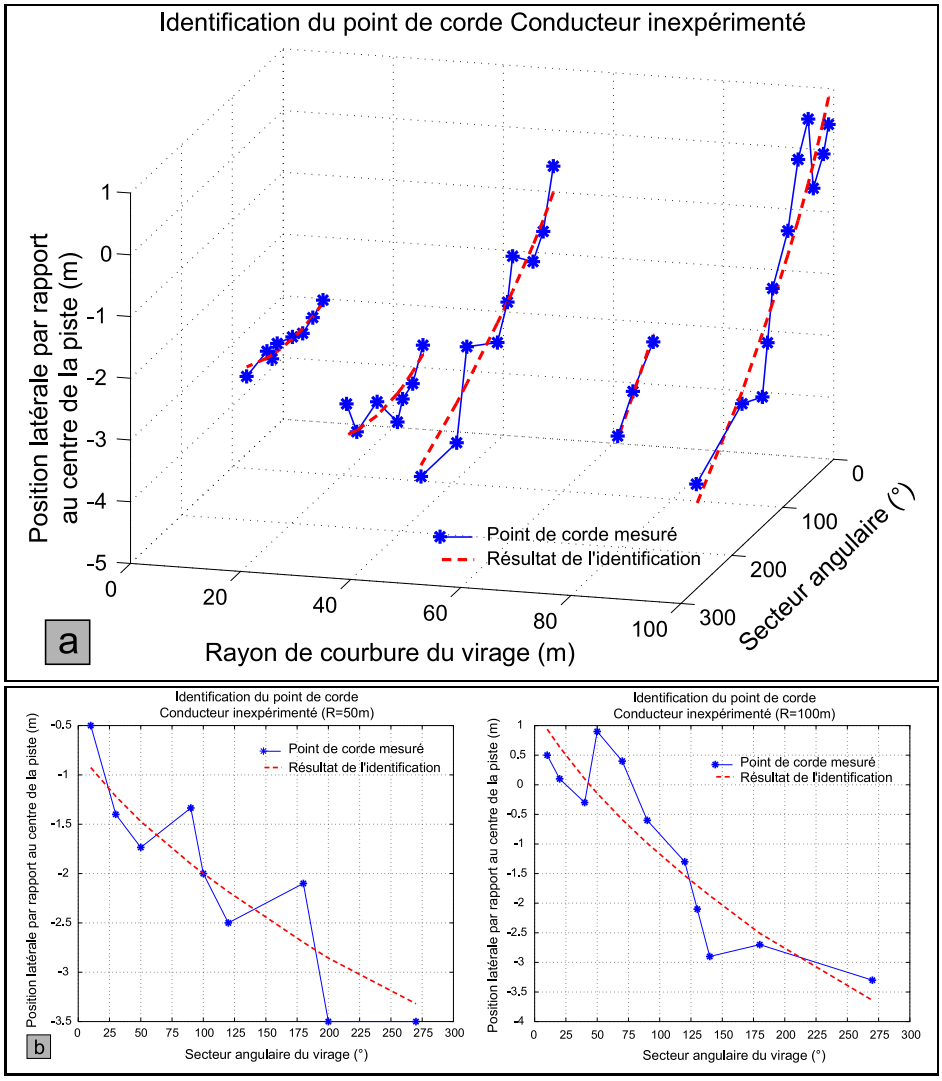


FIG. 3.15. : Point de corde suivant les caractéristiques (R, α) du profil routier

secteur angulaire, on constate cependant plusieurs irrégularités (augmentation "localisée" du rayon au point de corde, par exemple pour R=50 m et α=90° ou 180°). Il conviendrait de définir, probablement par d'autres expérimentations, le sens à donner à ces fluctuations dont l'ordre de grandeur se situe sensiblement dans le domaine de précision de la conduite d'un automobiliste "inexpérimenté". Sur une piste d'une largeur de 9 m comme c'est le cas ici, la reproductibilité du positionnement latéral du véhicule dans une même courbe n'est guère supérieure à 50 cm pour cette catégorie de conducteurs.

Les cas de figure illustrés ci-dessus ne font référence qu'à un profil de conducteurs et uniquement pour le point de corde. En ce qui concerne le point de plongée, c'est très logiquement le phénomène inverse qui est relevé : **le rayon de courbure au point de plongée tend à augmenter avec le secteur angulaire**. Alors que pour des virages de faibles secteurs angulaires, le conducteur "très expérimenté" maintient une conduite (en terme de positionnement et de sollicitations) relativement proche de la conduite en ligne droite, l'augmentation de l'angle du virage le conduit progressivement, en entrée de virage, à se déporter vers l'extérieur afin d'appréhender la phase de conduite dans sa globalité (augmentation du champ et de la distance de vision). Sur ce point également, des travaux complémentaires permettraient certainement de définir dans quelles limites cette constatation est vérifiée puisqu'il s'est avéré que pour des rayons de courbure élevés (au delà de 150 m) et quelque soit le secteur angulaire, le point de plongée "disparaît" au profit d'une trajectoire à sollicitations transversales constantes.

3.5.2.3. Estimation des points de jonction par logique floue

Les contraintes des "points objectifs" étant définies et quantifiées, il convient à présent d'identifier les phases d'entrée et de sortie virage. Celles-ci sont directement liées aux choix qu'effectuent le conducteur pour, selon ses critères (confort, efficacité...), suivre la trajectoire appropriée. Le caractère subjectif de la tâche de conduite, l'importance de l'expérience du conducteur ou encore sa maîtrise/connaissance du véhicule durant la conduite, sont autant de critères difficilement quantifiables mais dont l'influence sur les performances de conduite est considérable. L'évaluation des contraintes de continuité nécessitent par conséquent la prise en compte de ces facteurs.

Apport de la logique floue

Une des solutions les plus appropriées dans la quantification objective d'une analyse subjective est sans conteste la logique floue puisqu'elle représente de manière fidèle le mode de raisonnement humain. Introduite par Zadeh en 1965 [ZAD65], la logique floue est particulièrement adaptée pour la modélisation de systèmes non-linéaires. Son principal attrait réside dans la capacité à traiter des variables difficilement quantifiables, ou non exactes. "Grand", "petit", "élevé" ou "serré" sont des termes auxquels la logique floue permet d'apporter une quantification numérique sous forme d'ensembles d'appartenance. Cette technique a, de fait, été retenue pour la détermination des indicateurs comportementaux des points de jonction.

Principe

Les positions angulaires des points de jonction sont implicitement déterminées et liées au repère utilisé. Le seul indicateur qu'il convient de quantifier est donc la position latérale du véhicule à l'entrée et à la sortie du virage, i. e. le rayon de courbure en ces points. Pour ce faire, nous proposons de nous appuyer sur un des "points objectifs" considérés dans les sections précédentes : le point de corde. Ce point étant commun aux deux profils conducteurs étudiés, la méthodologie développée sera ainsi applicable dans les deux cas. Néanmoins, compte-tenu de la différence de positionnement relevée pour les deux classes de conducteurs, il conviendra de traiter ces cas individuellement : une variable d'entrée du système flou permet de définir le type de conducteur. L'idée consiste alors à définir les rayons R_0 et R_α comme des fonctions du rayon au point de corde :

$$\begin{array}{rcl} R_0 & = & R_C + A \\ R_\alpha & = & R_C + B \end{array} \tag{3.28}$$

où les coefficients A et B sont des constantes "floues", déterminées par un système d'inférence dont les entrées sont le rayon de courbure et le secteur angulaire du virage.

Structure du système d'inférence flou

Le système d'inférence flou est de type "Mamdani" (ou linguistique), les opérateurs de *conjonction* et de *disjonction* sont respectivement le *min* et le *max*, l'opérateur d'*implication* est le *produit*, d'*aggrégation* le *max*. La méthode de défuzzification choisie est le barycentre.

Partitions floues

Outre le type du conducteur, les entrées de l'estimateur flou sont le rayon de courbure et le secteur angulaire du virage. Les sorties représentent les constantes A et B, permettant de calculer les rayons aux points de jonction. L'ensemble de ces données est défini par des partitions floues triangulaires et trapézoïdales caractérisant le partitionnement des domaines de définition numériques par des variables linguisitiques.

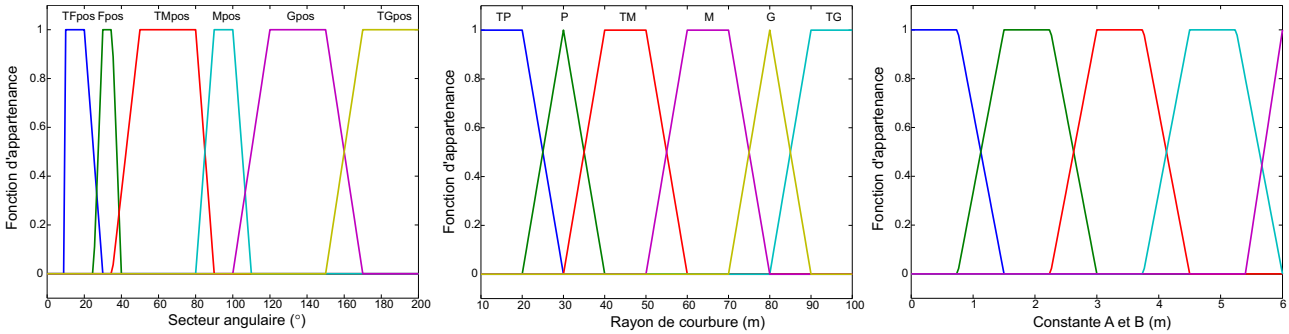


FIG. 3.16. : Partitions floues - Conducteur "inexpérimenté"

La forme de la partition floue du secteur angulaire s'explique par le phénomène d'irrégularité d'évolution du rayon au point de corde pour des secteurs angulaires faibles (cf. figure 3.15b). Effectivement, la partition représentant des angles avoisinant les 30° permet de tenir compte de l'inversement brutal de la courbe du rayon dont nous avons déjà parlé.

Hypersurfaces

Les représentations de la figure 3.17 illustrent l'évolution des constantes floues déterminées par l'estimateur, toujours dans le cas d'un conducteur "inexpérimenté".

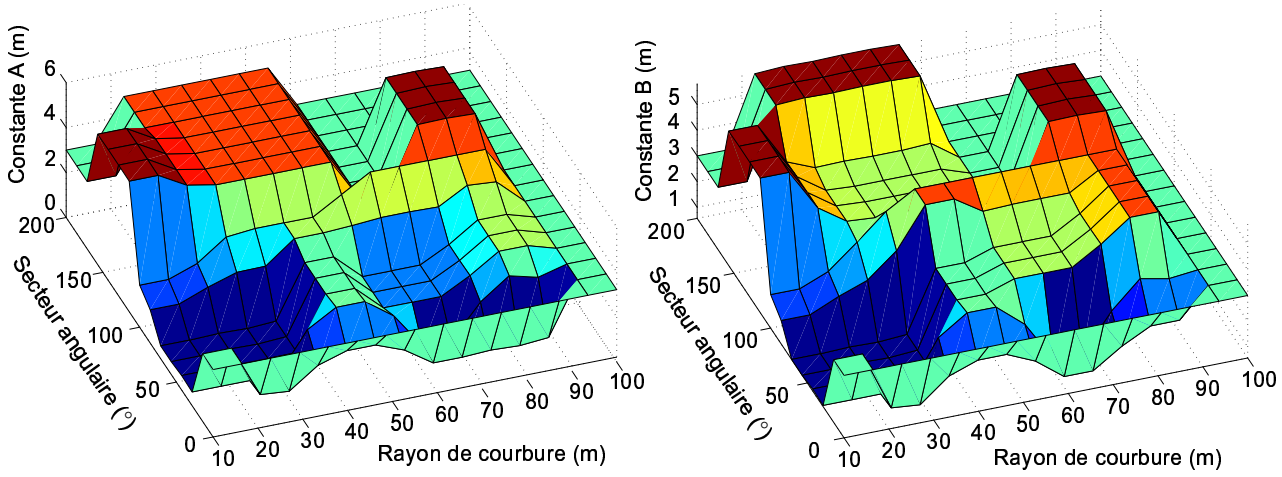


FIG. 3.17. : Hypersurfaces des constantes floues - Conducteur "inexpérimenté"

On notera notamment que, pour des virages ouverts ($\alpha \leq 50°$) et des rayons faibles (inférieurs à 50 m), le conducteur se trouve proche de l'accotement intérieur dès l'entrée du virage (la constante A étant inférieure à 1

m). Il s'écarte très largement de l'accotement lorsque le virage se ressert (donc avec l'augmentation du secteur angulaire) afin de maximiser le rayon de sa trajectoire.

3.5.2.4. Estimation des pentes et courbures aux points de jonction

Les contraintes définies pour les transitions entre les lignes droites et les virages tiennent compte de continuités à la fois en pente et en courbure (cf. équations (3.22) et (3.24)). La courbure étant directement liée au rayon du virage, une relation de linéarité entre ces deux termes a été mise en évidence à partir des essais effectués sur l'"Anneau du Rhin". Cette approche s'est montrée également valable pour l'estimation des pentes, donc du cap θ du véhicule en entrée (θ_0) et en sortie (θ_α) de virage. Les écarts entre les estimations des pentes (r'_0 et r'_α) n'ont qu'une incidence minime sur le cap du véhicule[14] (cf. tables 3.2 et 3.3) déterminé à partir de la relation (3.5).

			Mesures				**Estimations**			
Virage	R (m)	α (°)	r'_0 (m)	r'_α (m)	θ_0 (rad)	θ_α (rad)	r'_0 (m)	r'_α (m)	θ_0 (rad)	θ_α (rad)
14	30	-125	-5,3	9,3	**-0,17**	**-1,89**	-5,9	9,3	**-0,18**	**-1,89**
1	33	-135	-6,4	9,8	**-0,18**	**-2,06**	-6,1	9,5	**-0,18**	**-2,08**
5	34,5	-183	-8	11	**-0,21**	**-2,91**	-6,3	9,6	**-0,17**	**-2,94**
4	44,5	194	-4,2	9,3	**-0,09**	**3,57**	-7,1	10,3	**-0,15**	**3,59**
8	60	-145	-10	10,4	**-0,16**	**-2,36**	-8,2	11,4	**-0,14**	**-2,34**
13	150	-50	-15	18,2	**-0,1**	**-0,75**	-15,3	17,8	**-0,1**	**-0,75**

TAB. 3.2.: Pentes et caps aux points de jonction - Conducteur "inexpérimenté"

			Mesures				**Estimations**			
Virage	R (m)	α (°)	r'_0 (m)	r'_α (m)	θ_0 (rad)	θ_α (rad)	r'_0 (m)	r'_α (m)	θ_0 (rad)	θ_α (rad)
14	30	-125	-0,02	8,8	**0,00**	**-1,87**	1,61	10,98	**0,05**	**-1,81**
1	33	-135	0,2	14	**0,00**	**-1,95**	1,22	11,15	**0,03**	**-2,02**
5	34,5	-183	0,9	12,8	**0,02**	**-2,86**	1,04	11,24	**0,03**	**-2,89**
4	44,5	194	0,3	9,6	**0,01**	**3,59**	0,24	11,82	**-0,01**	**3,63**
8	60	-145	-0,5	12,8	**-0,01**	**-2,32**	-2,21	12,72	**-0,04**	**-2,32**
13	150	-50	-14,2	17,2	**-0,09**	**-0,76**	-13,7	17,96	**-0,09**	**-0,75**

TAB. 3.3.: Pentes et caps aux points de jonction - Conducteur "très expérimenté"

Les résultats du modèle de trajectoires finalement obtenu sont illustrés dans le chapitre 6. Celui-ci présente en outre, pour un conducteur et un virage donnés, les rayons réel et modélisé, et également une comparaison des trajectoires correspondantes.

Disposant d'un modèle de trajectoire pour la négociation d'une courbe, l'idée consiste à présent d'étendre son utilisation à des profils routiers complexes. Pour ce faire, un module de génération de trajectoires a été implémenté pour des profils composés de successions de lignes droites et de virages.

3.5.3. Application à la génération automatique de trajectoires

Lorsque le véhicule est localisé dans la base de données numérique, NAICC identifie le prochain virage que le conducteur va rencontrer. A partir des principes présentés ci-dessus, il est en mesure d'estimer, pour cette phase de conduite et sans considération du profil routier précédant le virage, une trajectoire de référence conforme à la situation, au conducteur et au véhicule. Pourtant, nombre de conducteurs débutent la négociation d'une courbe par une importante phase de freinage bien avant celle-ci, en utilisant les informations prélevées sur l'environnement. Ceci pose par conséquent le problème de la modélisation de situations plus complexes que de simples virages et concerne l'extension de la génération de trajectoires à des enchaînements de type virage - ligne droite - virage (V-LD-V). Dans ce cas de figure, les contraintes de continuité en positions, pentes et courbures sont une nouvelle fois un facteur important de la méthode choisie.

[14] et au final, sur la trajectoire générée.

3.5.3.1. Principe

Le but est de définir (géométriquement) une trajectoire en ligne droite à l'aide d'un polynôme cartésien, connaissant en ses points de départ (sortie du premier virage) et d'arrivée (entrée du second virage) les pentes et courbures à respecter[15]. Celles-ci sont imposées par les splines polaires respectifs à chaque virage. Comme précédemment, le nombre de contraintes va conditionner l'ordre du polynôme. La méthode retenue est la généralisation des polynômes du cinquième ordre décrits par NELSON pour la représentation de manœuvres de changement de voies [NEL89a, NEL89b]. Cette technique a récemment été implémentée par LAUGIER *et al.* dans un véhicule à conduite autonome [LAU99].

3.5.3.2. Repère et formalisme général

Cette fois le repère n'est plus lié au profil routier mais directement à la transition dont on cherche à définir un modèle. L'origine du repère est située sur le point de sortie du premier virage, et l'axe des abscisses est orienté vers le point d'entrée du second virage (cf. figure 3.18).

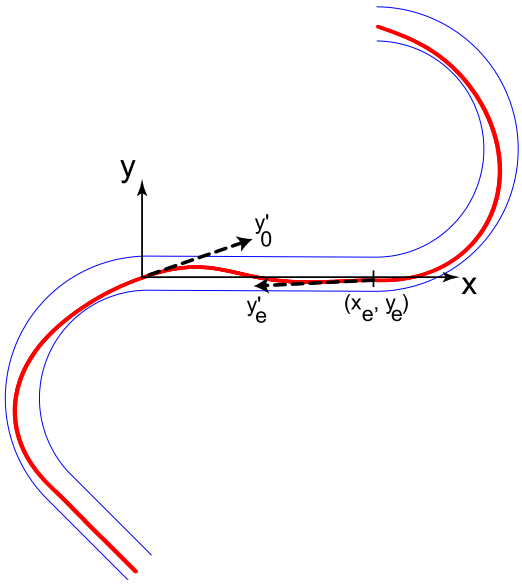


FIG. 3.18. : Repère de définition de la transition

En définissant des contraintes de **pente et de courbure nulles aux points de jonction**, NELSON obtient un polynôme portant le nom de "*Single Cartesian Polynomial*" (**SCP**). Seuls trois paramètres sont alors non-nuls :

$$y(x) = y_e \cdot \left[10 \cdot \left(\frac{x}{x_e} \right)^3 - 15 \cdot \left(\frac{x}{x_e} \right)^4 + 6 \cdot \left(\frac{x}{x_e} \right)^5 \right] \tag{3.29}$$

la courbure étant définit dans un repère cartésien par l'équation :

$$\kappa = \frac{\left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} \tag{3.30}$$

Cependant, les conditions de nullité aux extrémités d'une SCP ne satisfont pas aux contraintes de continuité imposées dans le cadre de la modélisation de trajectoire en virage. Dès lors, l'utilisation de telles courbes aurait pour incidence une discontinuité dans l'angle de braquage nécessaire à leur suivi, ce qui ne peut être envisagé dans notre application.

[15] Cette fois, ces grandeurs sont définies dans un repère cartésien.

3.5.3.3. Polynômes G-SCP

Devant le problème énoncé ci-avant, nous avons été amenés à généraliser l'utilisation des SCP à des transitions, où à la fois les pentes et les courbures peuvent être différentes de zéro. Nous nommerons par la suite les polynômes ainsi établis par "*SCP généralisé*" (G-SCP). Les conditions imposées deviennent alors :

$$\begin{aligned} \text{pour } x = 0 \quad &\Rightarrow \quad \frac{dy}{dx} = y'_0,\ \kappa = \kappa_0 \\ \text{pour } x = x_e \quad &\Rightarrow \quad \frac{dy}{dx} = y'_e,\ \kappa = \kappa_e \end{aligned} \tag{3.31}$$

On obtient finalement un polynôme d'ordre 5 :

$$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5 \tag{3.32}$$

où 5 des 6 paramètres sont non nuls :

$$a_0 = 0 \tag{3.33}$$

$$a_1 = y'_0 \tag{3.34}$$

$$a_2 = \frac{\kappa_0}{2} \cdot \left(1 + y_0'^2\right)^{3/2} \tag{3.35}$$

$$a_3 = \frac{20 \cdot A + x_e^2 \cdot C - 8 \cdot x_e \cdot B}{2 \cdot x_e^3} \tag{3.36}$$

$$a_4 = \frac{-x_e^2 \cdot C + 7 \cdot x_e \cdot B - 15 \cdot A}{x_e^4} \tag{3.37}$$

$$a_5 = \frac{x_e^2 \cdot C - 6 \cdot x_e \cdot B + 12 \cdot A}{2 \cdot x_e^5} \tag{3.38}$$

Les grandeurs A, B et C sont définies par les relations (3.39) à (3.41) :

$$A = y_e - x_e \cdot \left[y'_0 + \frac{\kappa_0}{2} \cdot x_e \cdot \left(1 + y_0'^2\right)^{3/2}\right] \tag{3.39}$$

$$B = y'_e - y'_0 - \kappa_0 \cdot x_e \cdot \left(1 + y_0'^2\right)^{3/2} \tag{3.40}$$

$$C = \kappa_e \cdot \left(1 + y_e'^2\right)^{3/2} - \kappa_0 \cdot \left(1 + y_0'^2\right)^{3/2} \tag{3.41}$$

La figure 3.19 montre l'allure des G-SCP ainsi que leur courbure pour différents cas. Pour ces exemples, on cherche à assurer la transition entre deux splines polaires représentant chacun la trajectoire du véhicule dans deux courbes séparées par une ligne droite. Trois configurations différentes ont été choisies : une transition entre deux virages de sens oppposé (cas a), se traduisant par des courbures de signe différent, une transition entre deux virages de même sens (cas b) et finalement, une transition avec des conditions de pente et de courbure initiales nulles (cas c). On peut constater qu'avec la généralisation des polynômes cartésiens d'ordre 5, un grand nombre de configurations pourra être obtenu avec l'assurance d'une courbure continue.

La mise en application de ce procédé est illustré dans le chapitre 6. Nous présentons, pour chaque conducteur, le résultat de la génération de trajectoires basée sur les splines polaires et les polynômes G-SCP.

A partir de ce type de trajectoires, différentes techniques de suivi peuvent être envisagées. La section suivante s'attache à effectuer un tour d'horizon de ces méthodes.

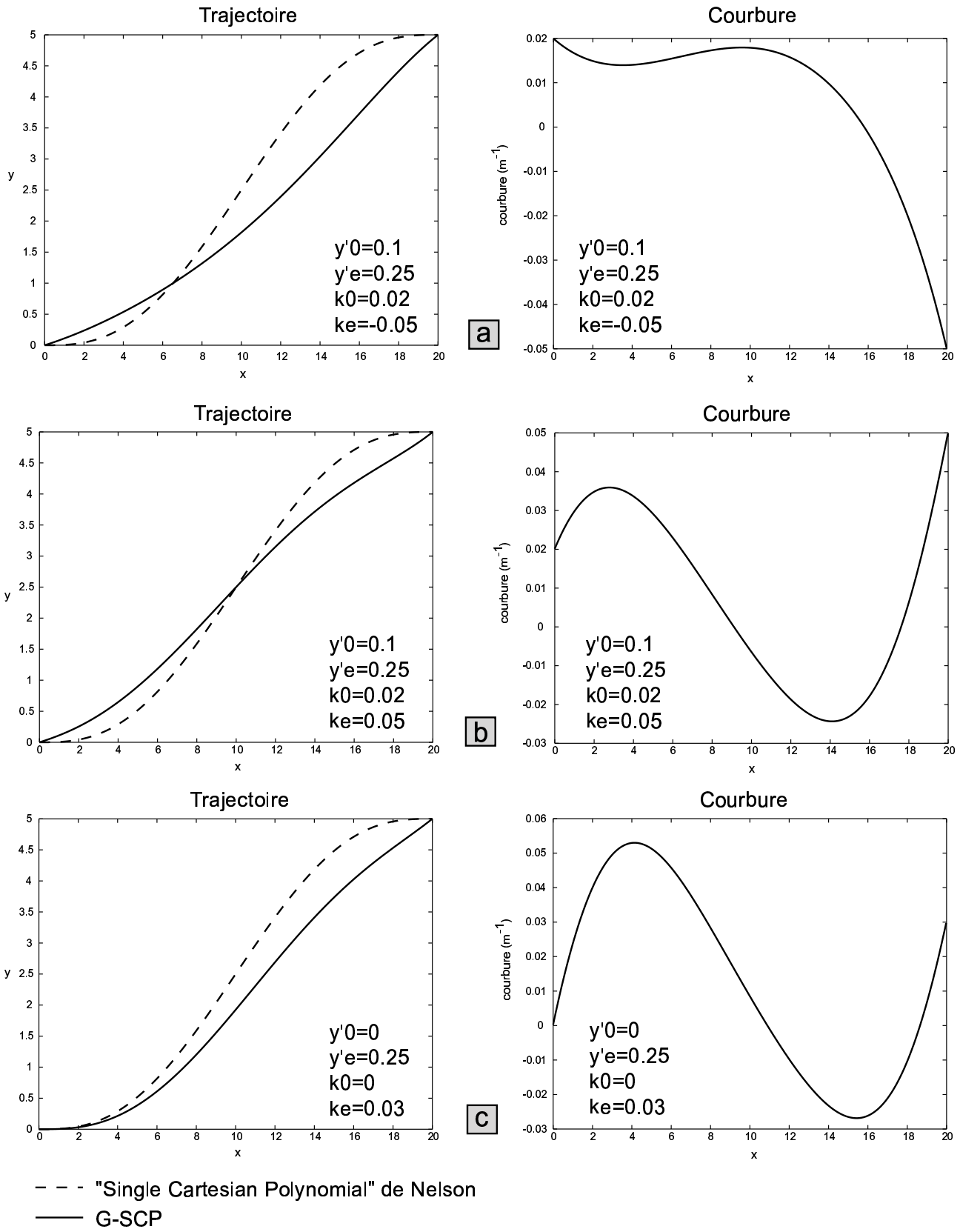


FIG. 3.19. : Comparaison entre SCP et G-SCP et leur courbure respective

3.6. Suivi de trajectoires : état de l'art

Bon nombre de travaux ont mentionné le caractère anticipatif du conducteur notamment dans la tâche de prise de virage. Dès lors, de manière à effectuer une commande efficace du véhicule, les techniques développées se sont intéressées à la représentation, dans les algorithmes de commande, de l'anticipation du conducteur. PENG et TOMIZUKA effectuent un descriptif des solutions possibles dans [PEN91, PEN93].

Les sections précédentes ont permis de concevoir un générateur de trajectoires à courbure continue et dont les trajets spécifiés en courbe modélisent le comportement du conducteur. Dans le contexte de la commande latérale du véhicule, il s'agit à présent de définir les techniques adéquates à l'obtention de lois de commande permettant de suivre la trajectoire générée. Du fait du large domaine d'application possible, la commande latérale par suivi de trajectoires a été, et demeure toujours très prisée : au travers d'une abondante littérature, de nombreuses approches sont proposées. Dès lors, cette section ne prétend pas effectuer un état de l'art exhaustif. Elle se focalise sur les méthodes qui peuvent correspondre aux objectifs fixés dans le cadre du projet NAICC.

Différentes techniques ont ainsi été définies pour garantir le suivi d'une trajectoire de référence. En général, elles se basent sur une **approche géométrique**. Celle-ci consiste à évaluer des écarts (longitudinaux, transversaux, angulaires...) entre un point de référence du véhicule et la trajectoire plusieurs mètres en avant du véhicule. Cette technique porte le nom de commande par pré-visualisation. La commande de type "***feedback/feedforward***" vise à ramener le véhicule vers la trajectoire si celui-ci s'en écarte. D'un autre côté, on dénombre les méthodes qui, à partir d'un **modèle cinématique ou dynamique du véhicule**, élaborent les lois de commande. Le modèle véhicule est souvent non linéaire lorsqu'il tient compte de phénomènes comme le roulis ou le tangage. Néanmoins, dans des conditions de conduite normales, le comportement peut être considéré linéaire et un modèle de type "lacet-dérive" peut alors être utilisé.

L'ensemble des théories dont dispose l'automaticien ont été appliquées au suivi de trajectoire. On dénombre classiquement les **commandes linéaires** de type PD, PID ou plus élaborées consistant à ajouter un caractère prédictif à la commande. Dans ce cas, les commandes "***feedback/preview***" sont fondées sur un terme dépendant de la courbure (connue *a priori*) du trajet à suivre. L'information d'anticipation porte le nom de "*preview signal*". Concernant la commande par modèle véhicule, la théorie de la commande robuste est largement employée.

BARTON montre, à l'aide de simulations pour des trajectoires à courbure continue que des contrôleurs intégrant une information prédictive fournissent de bien méilleurs résultats que les commandes "*feedback*" [BAR01]. La figure 3.20 reproduit ces résultats.

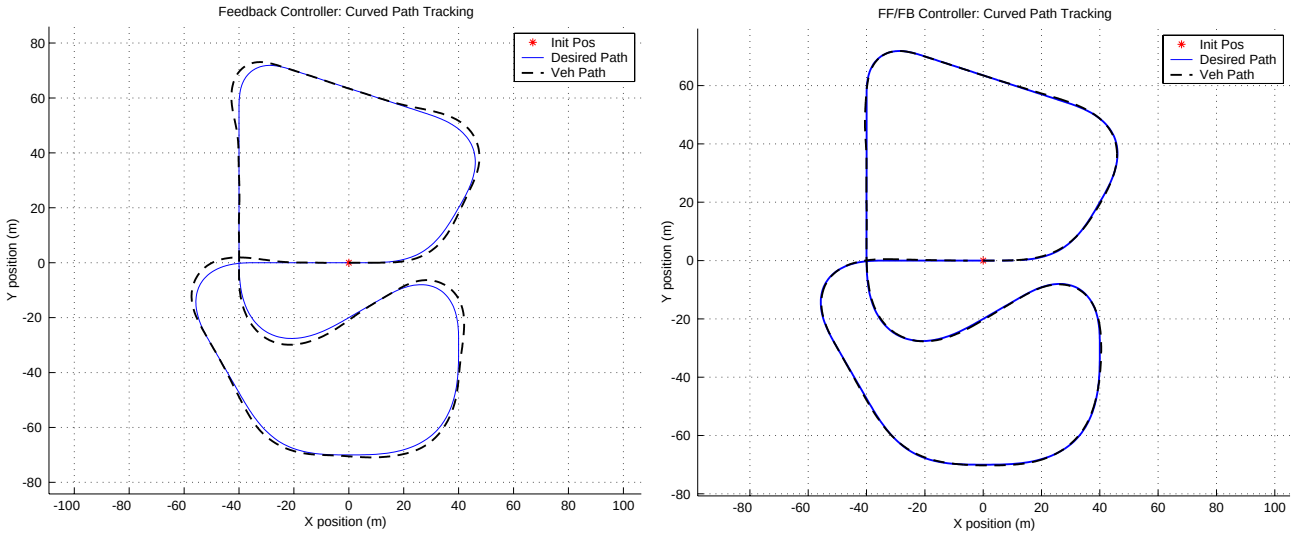


FIG. 3.20. : Suivi de trajectoire à courbure continue (extrait de [BAR01])

Dans les sections suivantes, les besoins pour le suivi de trajectoire du véhicule NADINE[16] sont introduits, et

[16]"*Navigation AiDed INtelligent Experimental vehicle*"

différentes méthodes de commande sont décrites en vue de la mise en œuvre de la commande latérale par suivi de trajectoire. La finalité que nous cherchons à atteindre ne se résume pas simplement par une minimisation de l'erreur de position, mais est analogue à celle présentée par BARTON pour le véhicule "UTE" [BAR01]. Elle consiste à assurer :

- une précision du positionnement (x, y) du véhicule,
- un cap (orientation) convenable par rapport à la direction de la trajectoire générée,
- un respect de la courbure de la trajectoire générée.

Ce choix est principalement guidé par l'importance des informations de cap et de courbure dans la modélisation du conducteur (cf. §3.4.2.3 et §3.4.2.4).

3.6.1. Commande par distance de pré-visualisation

Les techniques de poursuite sont basées sur la **sélection de points de référence de la trajectoire à suivre.** La commande est définie par rapport à une distance de pré-visualisation de la trajectoire. Les points de référence, sélectionnés plusieurs mètres à l'avant du véhicule, sont considérés comme des cibles à atteindre. Le point cible se trouve à une distance prédéfinie de la projection orthogonale du véhicule sur la trajectoire (cf. figure 3.21). L'asservissement consiste à déterminer géométriquement le cap nécessaire pour rejoindre le point cible (cf. figure 3.21). Le "suivi de la carotte"[17] est un algorithme de ce type [WIT00], efficace pour le suivi en ligne droite mais insuffisant pour des trajectoires courbes. Dans ce cas, le véhicule a tendance à couper les virages au lieu de suivre la trajectoire générée [BAR01].

La principale limitation de ces techniques réside dans le fait que la commande de braquage est uniquement fonction de la position (x, y) du point cible : ni la contrainte sur le cap, ni celle sur la courbure (et donc sur le braquage) au point cible ne sont respectées. La commande nécessaire pour rejoindre le point cible est uniquement fonction de l'erreur d'orientation du véhicule $\Delta\theta$.

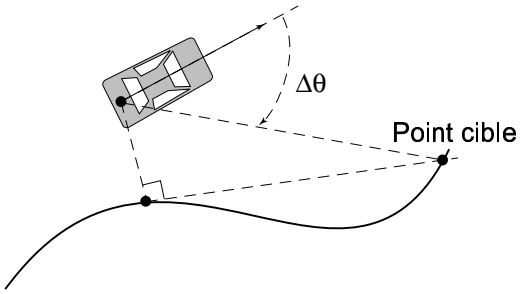


FIG. 3.21. : Technique de poursuite de cible

En tenant compte à la fois des erreurs d'orientation et de position, de meilleurs résultats peuvent être obtenus [SIN89, BAR01]. La commande de braquage est définie par une relation proportionnelle faisant intervenir les erreurs considérées :

$$\delta_f = \pm k \cdot d \pm k_\theta \cdot e_\theta \tag{3.42}$$

où k et k_θ sont les gains du système et d est l'erreur de position. L'erreur d'orientation e_θ est définie en fonction de l'orientation du véhicule par (figure 3.22) :

$$e_\theta = \theta_v - \theta_k \tag{3.43}$$

Une dernière alternative de la commande proportionnelle consiste à prendre en compte la courbure de la trajectoire désirée dans le calcul de la consigne de braquage[18].

Ces techniques restent cependant discutées du fait de l'inhomogénéité des grandeurs prises en compte (position, orientation et courbure n'ont pas les mêmes unités et sont aggrégées pour obtenir un critère unique). Par

[17] du nom anglais de l'algorithme "Follow the carrot"
[18] Dans ce cas, des contrôleurs de type "*feedback/feedforward*" sont souvent utilisés et permettent d'obtenir de bonnes performances.

ailleurs, utiliser un seul critère d'erreur fait disparaître une information souvent précieuse concernant la nature des erreurs (l'erreur de position est-elle plus/moins importante que l'erreur d'orientation ?).

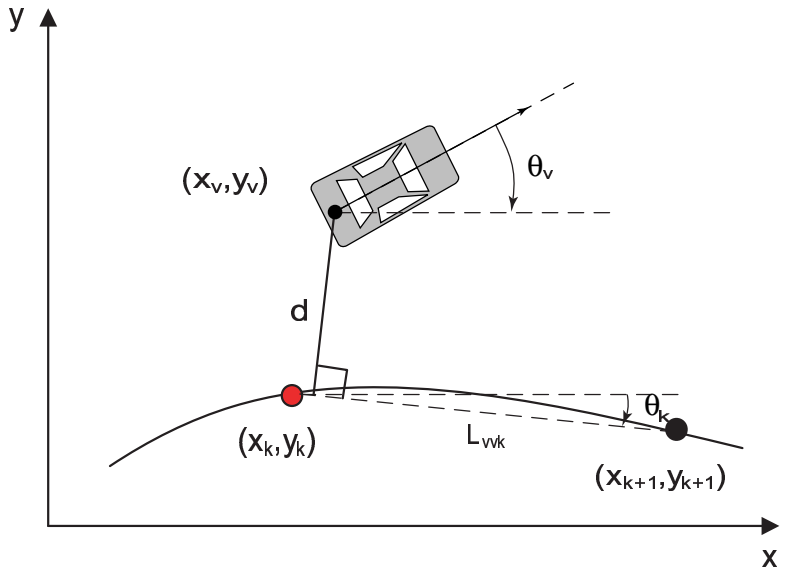


FIG. 3.22. : Minimisation des erreurs de position et de cap

En marge de ces approches géométriques de suivi de trajectoire, mais toujours basés sur l'idée de la poursuite d'une cible, on note les travaux de EGERSTEDT *et al.* [EGE98, EGE01]. Leur solution consiste, dans un premier temps à définir le point de la trajectoire (appelé point de référence) le plus proche du véhicule. Un point cible est alors défini par rapport au point de référence, en fonction de la distance de pré-visualisation choisie. Le déplacement de ce point cible sur la trajectoire est fonction de l'erreur de positionnement et d'orientation du véhicule : si l'erreur devient trop importante, le point cible "stoppe" son déplacement et "attend" que le véhicule se rapproche (l'erreur diminuant au fur et à mesure). Du fait de ce fonctionnement, les auteurs ont appelé cette méthode le "véhicule virtuel". Une loi de commande proportionnelle est utilisée pour élaborer la commande en fonction de la direction du véhicule θ, de la direction désirée θ_d et de l'angle de braquage maximal du véhicule par l'intermédiaire d'un paramètre k à ajuster :

$$\delta_f = -k(\theta - \theta_d) \tag{3.44}$$

Récemment, une méthodologie considérant à la fois les contraintes de non-holonomie du véhicule ainsi que la nature différente des informations de localisation et de cap du point cible, a été introduite par WIT pour le suivi géométrique de trajectoire [WIT00]. Celui-ci utilise le principe du mouvement hélicoïdale d'une vis[19] afin de caractériser le déplacement instantané d'un véhicule dans un repère donné. Deux vis sont nécessaires pour définir le mouvement de translation et de rotation du véhicule et leur choix s'opère par la minimisation des erreurs de positionnement et d'orientation par rapport au point cible. Des résultats, issus de simulation mais aussi d'expérimentations menées sur le véhicule autonome "NTV" ("*Navigation Test Vehicle*"), sont présentés dans ces travaux. Ils présentent la robustesse de cette technique par opposition aux méthodes de poursuite du type "suivi de la carotte".

3.6.2. Commande par modèle véhicule

Une solution particulièrement intéressante a été développée par SHARP *et al.* dans le cadre de la détermination de la consigne de braquage d'un véhicule de course de type Formule 1 [SHA00]. Bien qu'il s'agisse d'un **modèle mathématique du conducteur pour la commande latérale**, la volonté de ces travaux n'est pas d'imiter

[19]La théorie sur laquelle est fondé son algorithme porte le nom de "screw theory".

le conducteur mais bien de définir la commande nécessaire pour le suivi d'une trajectoire prédéfinie. Les auteurs définissent également une consigne de braquage proportionnelle basée sur une approche géométrique. Cette consigne est fonction de l'écart latéral entre le véhicule et la trajectoire, ainsi que de l'erreur d'orientation. L'originalité de la méthode réside dans le fait que l'écart est déterminé non pas par rapport à un point mais plusieurs points cibles (cf. figure 3.23). La consigne au volant devient alors :

$$\delta_f = k_\theta \cdot e_\theta + \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot e_i \tag{3.45}$$

où e_i représente les écarts entre une succession de points se trouvant sur la ligne de vision du conducteur[20] et leurs projections orthogonales sur la trajectoire désirée.

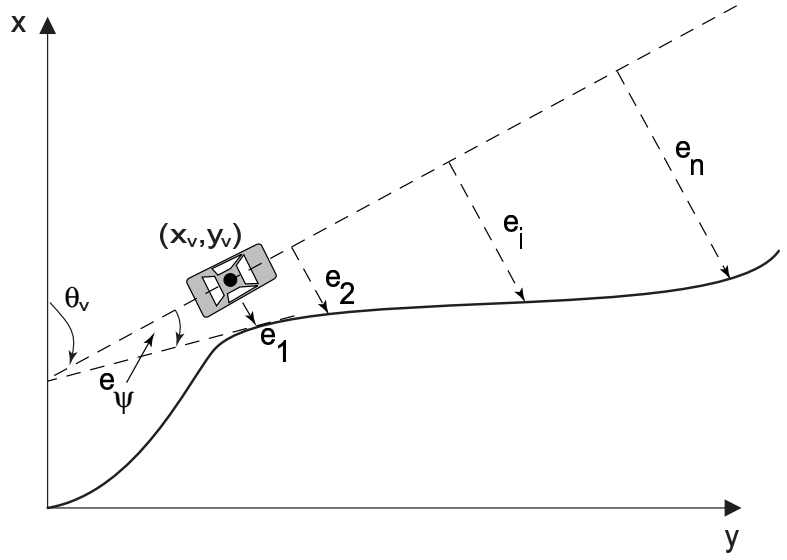


FIG. 3.23. : Modèle à multiples informations prédictives

Cette méthodologie est donc caractérisée par l'utilisation de plusieurs informations prédictives pour l'élaboration de la loi de commande. Son application à un véhicule de course s'opère par l'emploi d'un modèle à 5 degrès de liberté prenant en considération les non-linéarités des pneumatiques et leur saturation dans des conditions de roulage proches des limites. Ce phénomène de saturation est pris en compte dans l'élaboration de la loi de commande afin que celle-ci soit fidèle au comportement sous ou survireur d'un véhicule. La détermination des paramètres de la loi de commande reste cependant une des limitations de cette solution puisqu'elle est effectuée de manière empirique et fait davantage appel à l'expertise de l'automaticien plutôt qu'à des méthodes d'identification précises.

Par ailleurs, on dénombre les applications basées sur la théorie de la commande robuste. Des objectifs de commande en terme de confort et de robustesse[21] peuvent être définis, ce qui est particulièrement intéressant pour la commande latérale. Citons par exemple les travaux de RAMIREZ MENDOZA *et al.* [RAM01] qui élaborent une commande (s'appuyant sur la théorie "*Robust Predictive Control*") appliquée à un modèle véhicule non-linéaire.

Finalement, PENG et TOMIZUKA s'intéressent directement au modèle véhicule afin de définir l'angle de braquage [PEN91] en considérant la courbure (connue *a priori*) comme une perturbation du système. Cette solution nécessite des techniques de programmation spécifiques (programmation dynamique) et coûteuses en temps de calcul.

[20] suivant l'axe longitudinal du véhicule.
[21] par rapport aux variations de vitesse, d'adhérence...

3.6.3. Synthèse

Pour le suivi de trajectoire à courbure continue, deux choix doivent être effectués. Le premier concerne le type d'approche à favoriser, géométrique ou basée sur un modèle véhicule, alors que le second concerne la commande à développer. Les techniques de poursuite décrites dans le paragraphe 3.6.1 possèdent l'avantage d'être aisées à mettre en œuvre. Leur limitation principale réside dans leurs performances pour le suivi de trajectoire en courbe qui demeure pourtant l'objectif de NAICC. Dès lors, une des solutions se détachant concerne l'approche basée sur l'utilisation de plusieurs informations prédictives telle que présentée par Sharp *et al.*. Néanmoins, dans cette dernière, la courbure du tracé n'est pas considérée alors qu'elle représente la caractéristique fondamentale des trajectoires calculées. En intégrant cette donnée dans la méthode de commande, une consigne de braquage fonction de la courbure non-nulle pourrait être obtenue, et cela même dans le cas de figure où les erreurs de position et de cap sont acceptables.

La théorie de commande robuste possède un avantage considérable qui est de pouvoir définir des critères de confort et de robustesse. Ramirez Mendoza *et al.* emploie en particulier un critère sur l'accélération transversale comme un des objectifs de la commande. Nous montrons dans le chapitre 4 qu'un critère de confort identique est à l'origine de la détermination de la vitesse de consigne en courbe. Ainsi, une solution de ce type semble apporter des éléments de réponse intéressants dans le cadre de la commande latérale de NAICC.

Concernant la génération de trajectoire, l'accent a été mis sur la volonté de décrire une trajectoire respectant une contrainte de continuité sur la courbure. La solution retenue définie une trajectoire géométrique et donc sa courbure en tous points. Par conséquent, disposant de l'information nécessaire pour la commande prédictive, et compte tenu des performances de ce type d'asservissement, nous nous orientons naturellement vers cette catégorie de solutions.

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué la commande latérale d'un véhicule par suivi de trajectoire. Pour ce faire, une méthode de génération de trajectoires dont le fonctionnement est basé sur une modélisation du conducteur a été élaborée. Une étude de deux styles de conduite distincts, les conducteurs "inexpérimentés" et "très expérimentés" a été menée. Celle-ci a permis de définir l'ensemble des critères représentatifs de leur profil, et nécessaires à l'obtention de trajectoires en virage propres à chaque catégorie.

Les splines polaires utilisés pour modéliser les trajectoires en courbe, associés à des polynômes cartésiens d'ordre 5 (SCP-généralisés) pour les transitions entre deux virages, permettent de définir des chemins respectant en tout point une contrainte de continuité sur la courbure. Cette dernière est primordiale dans le cadre de la commande latérale : une discontinuité de la courbure se traduisant inévitablement par une impossibilité de suivre précisément le chemin.

La stratégie du conducteur dans la phase de prise de virage a été reproduite à l'aide de la logique floue, particulièrement intéressante pour représenter le caractère subjectif du jugement de l'automobiliste. Ainsi, les polynômes polaires sont adaptés en fonction d'une part, de la topologie de la route, et d'autre part des "points objectifs" représentatifs d'un style de conduite et définis par l'estimateur flou. La solution ainsi développée proccure l'avantage considérable de définir, pour une situation de conduite donnée (un virage), la trajectoire de référence et la vitesse de consigne adéquate. Ce procédé permet donc d'envisager une assistance à la conduite où les dynamiques longitudinale et latérale seraient couplées. Dans le chapitre suivant, nous présentons la démarche suivie pour mettre en œuvre la commande longitudinale, connaissant la vitesse de consigne à suivre.

La deuxième partie de ce chapitre s'est attachée à mettre en avant les solutions envisageables pour l'asservissement par suivi de trajectoire envisagé dans le projet NAICC. Cette étude prospective est bien sûr non exhaustive tant les applications sont nombreuses dans cette thématique. Néanmoins, elle a permis de définir les performances de solutions comme le suivi par poursuite ou encore les méthodes basées sur la commande prédictive. Finalement, dans le cadre du suivi d'un chemin à courbure continue, il convient de s'appuyer sur la disponibilité d'informations d'anticipation (puisque la trajectoire est pré-déterminée) pour établir une commande de braquage qui permet de minimiser les écarts de position, d'orientation et de courbure entre le chemin suivi par le véhicule et la trajectoire désirée.

Chapitre 4

Régulation de vitesse assistée par un système de localisation

"L'arrivée des microprocesseurs dans les éléments de sécurité automobile permettra de faire des accidents high-tech."

Prédiction de Krashtest Dummy

Sommaire

4.1. Introduction 81
4.1.1. Contexte 81
4.1.2. Problématique et méthodologie 82
4.2. L'asservissement longitudinal 83
4.2.1. Régulation sans perception de l'environnement 83
4.2.2. Régulation par perception de l'environnement 83
4.3. L'assistance longitudinale de NAICC 86
4.3.1. Principe 86
4.3.2. Domaine de validité 86
4.4. Estimation des sollicitations longitudinales 87
4.4.1. Estimation de la vitesse de consigne 87
4.4.2. Modélisation de la phase de freinage 88
4.5. Modélisation de l'activité longitudinale par un automate d'états finis 90
4.5.1. Entrées de l'automate 91
4.5.2. Etats de l'automate 92
4.5.3. Sorties générées 92
4.6. Conclusion 93

4.1. Introduction

4.1.1. Contexte

Dans le contexte de l'assistance à la conduite et de la réduction de la charge du conducteur, l'asservissement longitudinal (régulation de vitesse du véhicule) a représenté un des principaux axes de recherche de ces 20 dernières années. Ces recherches s'inspirent d'un constat : le conducteur est de plus en plus sollicité (de part l'augmentation du trafic), il doit gérer davantage d'informations et ne peut donc répondre convenablement à l'ensemble de ces sollicitations. Ainsi, l'idée consiste à le suppléer dans des tâches facilement réalisables par des

systèmes automatisés. Libéré de ces tâches souvent monotones, le conducteur peut se consacrer pleinement au côté stratégique de la conduite, c'est-à-dire à la perception et l'analyse de la situation afin de répondre plus promptement à toute sollicitation.

Pour cette raison, ces aides à la conduite sont souvent présentées comme des dispositifs agissant davantage sur le confort que sur la sécurité des automobilistes. En soulageant ainsi le conducteur, ce dernier se fatigue moins et la conduite devient plus confortable. Il convient cependant de noter[1] que, même si ces systèmes sont destinés à aider le conducteur, ce dernier demeure entièrement responsable de la tâche de conduite et ne doit en aucun cas se reposer sur le DAC. Dans le cas contraire, il ne serait pas prêt (physiquement et psychologiquement) à reprendre le contrôle lors de l'apparition d'une situation critique. Ces composants ne disposent pas des facultés de perception nécessaires pour remplacer le conducteur. Si les chercheurs et développeurs ont, dès le départ, été conscients de ces limitations [NAA94, SCH96b], il n'en est pas toujours ainsi pour leurs utilisateurs.

Si l'apport en terme de sécurité est sujet à controverse, bon nombre d'études ont montré l'efficacité de la régulation longitudinale en terme de confort bien sûr, mais également d'un point de vue écologique. La régulation de vitesse (*"Cruise Control"*) ou d'interdistance entre véhicule (*"Adaptive Cruise Control"* ou *"Intelligent Cruise Control"*) limite en effet les multiples accélérations et freinages auxquels s'addonnent le conducteur ne disposant pas de ces systèmes.

Ce chapitre dresse en premier lieu une brève synthèse sur la régulation longitudinale. Il présente à ce stade deux méthodes de régulation de vitesse qui diffèrent par leur niveau de perception de l'environnement. La première génération de dispositifs ne bénéficiaient d'aucune information relative à l'environnement (voisin ou non) du véhicule. Ces régulateurs n'ont pour rôle que de stabiliser la vitesse du véhicule autour d'une consigne indiquée par le conducteur (paragraphe 4.2.1). Récemment est apparu une nouvelle génération de régulateurs dits "intelligents" capables de percevoir les véhicules proches. Ceux-ci adaptent la vitesse en fonction de l'évolution du trafic (paragraphe 4.2.2).

Dans un deuxième temps, nous exposons le principe de régulation environnementale de la vitesse développée durant ces travaux de thèse.

4.1.2. Problématique et méthodologie

L'axe longitudinal dont il s'agit dans ce chapitre vise à développer un système d'assistance fondé sur la **régulation de vitesse en fonction du profil routier**. La démarche amorcée dans cette thèse s'oriente sur la **détection d'une vitesse inappropriée à l'environnement de conduite**, pouvant aboutir à une situation critique (freinage critique). Précédemment, il a été montré que, lorsque le véhicule est localisé sur la base de données étendue (cf. chapitre 5), il devenait possible de définir une trajectoire de référence pour une situation de conduite identifiée. Par ailleurs, les splines polaires choisis pour la modélisation de trajectoires procurent l'avantage considérable de pouvoir définir des contraintes dynamiques à respecter durant le suivi du modèle ainsi obtenu. Nous verrons dans ce chapitre comment cette particularité est utilisée afin de définir une **vitesse de consigne en adéquation avec la trajectoire prédéterminée**. Cette **vitesse est estimée à partir d'un critère de confort** implicitement lié à la notion de sécurité de conduite et dépendant du style de conduite de l'automobiliste.

A partir de la vitesse de consigne et de la vitesse réelle du véhicule, la phase de freinage nécessaire (cf. §4.4.2) pour atteindre la courbe dans de bonnes conditions de conduite est identifiée. Pour ce faire, un automate d'états finis (cf. §4.5) a été implémenté. Celui-ci modélise les différentes étapes relatives à la négociation d'un virage (l'approche, la phase de freinage, la prise de virage et la réaccélération en sortie). Des essais en simulation et en conditions réelles sont présentés dans le chapitre 6. Ils illustrent entre autres la validité de la méthode retenue.

L'originalité de la démarche réside dans l'utilisation de la cartographie étendue qui procure un caractère prédictif important au dispositif. Le système identifie la prochaine phase de conduite importante liée à l'environnement et détectée dans la base de données afin de définir les conditions d'évolution du véhicule. Néanmoins, comme pour un régulateur de vitesse classique, toute manœuvre spécifique (dépassement d'un véhicule, évitement d'obstacles...) intervenant avant la situation détectée par le système est gérée par le conducteur (demeurant prioritaire !). Ce dernier conserve à tout moment la maîtrise du véhicule.

[1] Il conviendrait très certainement également d'informer et de former les acheteurs de ce type de dispositifs !

4.2. L'asservissement longitudinal

Indépendamment des méthodes de commande, nous décrivons dans cette section les différents dispositifs de régulation de vitesse d'un véhicule routier. Ceux-ci sont en cours de conception ou déjà commercialisés et sont connexes au dispositif d'asservissement de vitesse de NAICC. Nous pourrons par la suite définir en quoi le projet NAICC se démarque de ces différentes solutions et quel peut être l'apport de ces travaux.

Depuis quelques années, la recherche automobile a conduit au développement de nouveaux organes de commande, les plus connus et répandus sont le freinage d'urgence ou encore l'ESP (très récemment mis sur le marché). Si l'on se reporte à la hiérarchisation des tâches de statibilisation-guidage-navigation (cf. §1.4.1.1), ces dispositifs ont tous pour but d'intervenir au niveau le plus bas, c'est-à-dire celui de la stabilisation. Le régulateur de vitesse est typiquement une aide de cet ordre (cf. §4.2.1). Contrairement à l'ABS ou l'ESP, et plus globalement aux systèmes de stabilisation, l'objectif du CC est d'accroître le niveau de confort du conducteur en le déchargeant d'une tâche.

Par ailleurs, des dispositifs agissant au niveau dit de navigation ont également fait leur apparition et sont à présent courants. Sous l'impulsion de grands projets européens tels PROMETHEUS ou DRIVE, on assiste dorénavant à l'émergence d'assistances intervenant au niveau intermédiaire de guidage (c'est-à-dire une fois que le trajet global a été défini -navigation- et qu'il convient de le suivre). Typiquement, ces systèmes ne se réfèrent plus uniquement aux données mesurées sur le véhicule mais, à l'aide d'une nouvelle génération de capteurs, tiennent compte d'informations relatives au trafic proche de celui-ci (cf. §4.2.2). Le couplage d'un dispositif de localisation du véhicule et d'un régulateur de vitesse procure par conséquent à NAICC un caractère particulier. Cette assistance intervient à la fois aux niveaux de stabilisation et de guidage.

4.2.1. Régulation sans perception de l'environnement

Disponible depuis près de 20 ans, le "Cruise Control" n'a fait réellement son apparition dans les véhicules européens que depuis quelques années. Il est à présent proposé sur quasiment toutes les catégories de véhicules. Le CC a été élaboré principalement pour les trajets sur autoroutes où les variations de vitesses sont, dans des conditions normales de trafic, très limitées. Au delà de 40 km/h et une fois activé, ce dispositif asservi la vitesse du véhicule autour d'une consigne spécifiée par le conducteur. Une action sur l'accélérateur (lors d'un dépassement) permet à ce dernier de reprendre le contrôle du véhicule. De même, l'asservissement de vitesse est arrêté par simple appui sur la pédale de frein.

Le dispositif de commande employé par le conducteur se présente généralement sous forme d'une télécommande (cf. figure 4.1) avec laquelle le conducteur peut :

- mettre en marche et arrêter le régulateur,
- sélectionner une consigne de vitesse par appui sur un bouton lorsqu'il a atteint la vitesse désirée,
- accélérer et décélérer par paliers.

L'asservissement s'effectue par action directe sur le papillon d'admission d'essence (un moteur agit sur l'ouverture du papillon).

4.2.2. Régulation par perception de l'environnement

Le CC présenté précédemment a, de part un niveau de perception limité, également une fonctionnalité limitée. N'utilisant qu'une information de vitesse et donc une information relative à l'état du véhicule, il ne peut agir en fonction d'évènements extérieurs. La proximité d'un véhicule dont la vitesse est inférieure et qu'il conviendrait de doubler, ou encore la proximité d'un virage où il conviendrait cette fois de ralentir ne peuvent être pris en compte et nécessitent une intervention du conducteur. C'est pourquoi, si ces dispositifs accroissent le confort de conduite, il convient de noter que le conducteur doit maintenir un niveau d'attention important sur l'activité de conduite puisqu'il demeure responsable des actions les plus délicates liées à la sécurité.

Depuis peu, et après une dizaine d'années de recherche dans le domaine, des dispositifs d'asservissement de nouvelle génération ont été introduits sur le marché dans les berlines haut de gamme. Ces produits reposent sur deux types d'informations [ROS98] :



FIG. 4.1. : Télécommande & récepteur HF du véhicule NADINE

- la perception de l'environnement, et plus précisément du trafic proche du véhicule. On qualifiera cela de **perception relative**,
- la localisation du véhicule en longitudinal et en latéral, donc une **perception absolue**.

La complexité d'intégration des deux procédés de perception demeure cependant encore un frein au développement d'aides de ce type. Par conséquent, la plupart des assistances ne sont consacrées qu'à une des deux catégories.

4.2.2.1. Gestion de l'environnement "dynamique"

Le premier dispositif d'assistance, capable de détecter l'environnement proche du véhicule et ayant fait l'objet de nombreuses recherches [FRI96, HOL97, PRE00] est le **régulateur de vitesse intelligent** (*ACC* pour "*Adaptive Cruise Control*", ou *ICC* pour "*Intelligent Cruise Control*"). L'ACC a récemment été introduit sur le marché et est une extension du régulateur de vitesse : en ajoutant un mode de perception, la fonctionnalité de ce premier système a été élargie. Cette prestation est une aide à la conduite sur autoroutes permettant de maintenir une distance de sécurité entre des véhicules circulant sur la même voie. En pratique, le conducteur indique la vitesse à laquelle il souhaite circuler. Un capteur de proximité (télémètre laser ou capteur à micro-ondes) permet de détecter les objets présents à l'avant du véhicule. Si aucun véhicule n'est présent dans le champ, l'ACC agit sur le papillon d'admission d'essence pour atteindre et maintenir la vitesse de consigne. Dans ce mode de fonctionnement de "**gestion de vitesse**", il se comporte comme un CC classique. Si un véhicule plus lent est détecté, l'ACC passe en mode "**gestion de distance**" afin de maintenir une distance de sécurité par l'intermédiaire du papillon de gaz et éventuellement des freins. Comme pour le CC, à tout moment le conducteur peut reprendre le contrôle.

Depuis le développement et la mise à disposition du public de ces dispositifs d'asservissement, il se pose le problème de la sécurité, voire de l'insécurité liées à leur utilisation. C'est pourquoi, le conducteur se trouve de plus en plus souvent au centre des recherches menées pour l'assistance à la conduite. Dans le cas de figure de l'ACC, le conducteur est soulagé d'une tâche qui réduit son activité et l'on peut à juste titre se demander s'il n'aurait pas tendance à se reposer plus que de raison sur le dispositif. Ceci pourrait par exemple entraîner une incapacité d'intervenir à temps lors d'une situation critique. Ainsi, avant la commercialisation de ces produits,

des tests sont effectués pour évaluer leur impact sur l'automobiliste[2]. Hitz *et al.* ont par exemple effectué des expérimentations sur l'utilisation de l'ACC à partir de 108 conducteurs. Ils sont parvenus aux conclusions suivantes [HIT00] :

- les conducteurs attendent l'intervention de l'ACC et de fait, interviennent plus tard mais ce phénomène ne créé en général pas de situations extrêmes,
- les conducteurs utilisant l'ACC ont un temps de réponse plus long que ceux n'utilisant pas ce dispositif, mais aussi moins long que les utilisateurs de CC classiques. Néanmoins, comme les distances inter-véhicules sont plus grandes lors de l'emploi de l'ACC, il n'est pas établi que cette augmentation du temps de réponse implique une inattention de la part du conducteur,
- les conducteurs jugent l'ACC moins sûr que la conduite classique, mais plus sécurisante que le régulateur de vitesse.

Finalement, de nombreux travaux souvent axés sur l'extension des fonctionnalités de l'ACC ("*Stop & Go*", arrêt sur obstacles...) sont en cours, principalement dans le cadre des projets cités au paragraphe 2.2.6.

4.2.2.2. Gestion du profil routier

Les projets en cours d'élaboration mentionnés ci-dessous sont pour la plupart liés à une constation : les fonctionnalités des régulateurs de vitesse et de distance sont principalement limitées par la capacité de perception réduite de l'environnement. Or, depuis peu, de nouveaux capteurs ont fait leur apparition dans l'automobile et l'idée consiste donc à les intégrer dans une structure globale de perception et de commande. Ces capteurs concernent la localisation absolue du véhicule et sont pour l'heure utilisés uniquement par les dispositifs de navigation. Or leur intégration, et donc l'intégration d'une perception absolue dans un dispositif essentiellement fondé sur la perception relative de l'environnement, ouvre de nouvelles voies [ROS98] :

- "*Adaptive Front-lighting System*" (AFS) [BIR01] : projet européen arrivant à son terme dont l'objectif est d'optimiser l'éclairage des véhicules en intégrant des fonctions de contrôle de leur orientation suivant la localisation du véhicule (pour annoncer un virage imminant au conducteur) ou en adaptant la forme du faisceau suivant l'environnement proche du véhicule (cf. figure 4.2),
- "*Intersection Collision Avoidance System*" : évitement de collision aux intersections : avertit le conducteur de l'imminence d'une intersection et de la nécessité de réduire sa vitesse,
- "*Smart throttles*" : anticipation des changements de profil routier (virages, ...) afin de réduire la consommation d'essence et optimiser les performances,
- "*Curve warning system*" : avertit le conducteur ou réduit automatiquement la vitesse du véhicule lorsqu'il s'approche d'un virage,
- ...

Le point commun de toutes ces applications potentielles est l'emploi de la base de données d'un système de navigation afin d'augmenter le degré de perception. Cependant, il convient de remarquer que ces bases de données sont pour l'heure spécifiques aux systèmes de navigation et n'intègrent pas forcément les données nécessaires pour garantir le fonctionnement des procédés cités précédemment.

Le système d'aide NAICC s'apparente à cette dernière classe de dispositifs qui fait depuis peu l'objet de recherche. En effet, hormis avec l'appui d'une base de données, il est difficile de détecter suffisamment tôt et précisément un changement de courbure de la route et d'en avertir le conducteur. Certains auteurs ont envisagé des méthodes d'estimation de courbure, à partir de la segmentation du profil fourni par un système de navigation classique [TAM94]. Si l'estimation est convenable, elle n'est cependant pas suffisante pour envisager d'asservir la vitesse du véhicule en virage. Enfin, Gallet *et al.* [GAL00] présentent de leur côté l'outil de simulation "Smile" utilisé pour valider différents scénarios d'adaptation de la vitesse à l'environnement. Malheureusement, aucune application en conditions réelles n'est présentée.

[2]Ces tests sont d'ailleurs placés au centre du développement de ce type de systèmes depuis le dramatique constat effectué après l'introduction sur le marché de l'ABS : l'anti-blocage des roues a pour effet d'allonger les distances d'arrêt d'un véhicule alors que les conducteurs étaient persuadés que ce système de freinage efficace pouvait leur permettre de freiner plus tard...

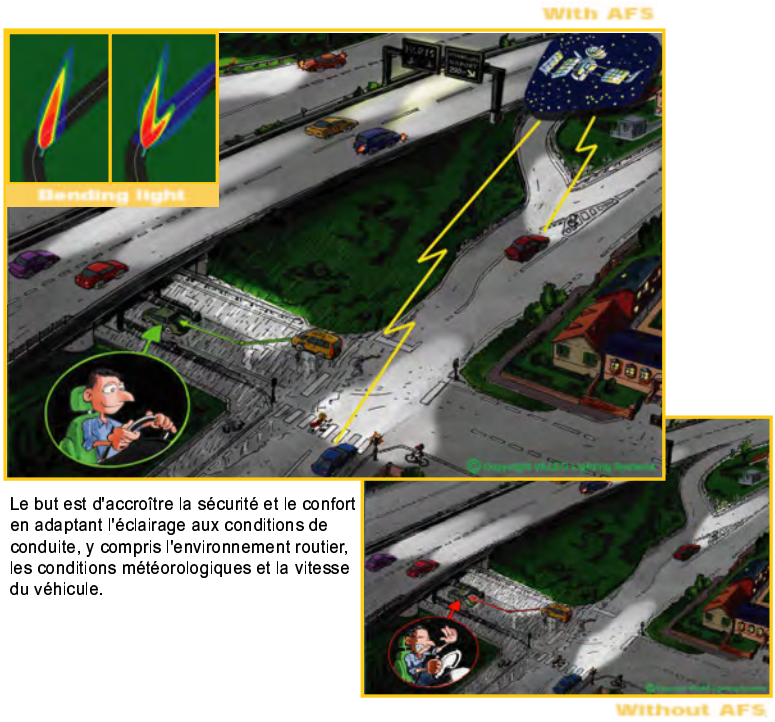


FIG. 4.2. : "Adaptive Front-lighting System" (Extrait de "Seeing and being seen", *Valéo*)

4.3. L'assistance longitudinale de NAICC

4.3.1. Principe

Les principes généraux du régulateur d'allure ainsi que l'architecture du dispositif initié dans ces travaux ont été évoqué dans le chapitre 2. Nous rappellerons simplement que l'intérêt réside dans le couplage d'un système de localisation structuré autour d'une base de données étendue (cf. chapitre 5), et d'un module de prédiction de la vitesse en fonction du profil routier.

L'idée dans NAICC, consiste à constamment identifier la prochaine phase de conduite nécessitant une attention particulière du conducteur ou son intervention. Ainsi, l'assistance peut soit avertir le conducteur lorsqu'il s'approche trop rapidement (mode de fonctionnement boucle ouverte), soit intervenir (mode boucle fermée). Dans ce dernier cas, il ralentit le véhicule jusqu'à atteindre une vitesse de consigne fonction du profil routier mais également déterminée en tenant compte des caractéristiques du véhicule et du profil du conducteur (cf. §4.4.1).

Le régulateur longitudinal décrit ici représente une des possibilités d'extension de l'actuel ACC, l'utilisation de la localisation absolue pouvant ajouter un caractère prédictif important à ce système. Par conséquent, nous nous intéresserons spécifiquement à la prise en compte du profil routier et ne reviendrons pas sur la gestion des "obstacles" que le conducteur peut rencontrer lors de son trajet. Cette fonctionnalité réalisée par un ACC classique ne fait pas l'objet de nos travaux, car déjà largement opérationnelle et validée par ailleurs.

4.3.2. Domaine de validité

Afin de pouvoir valider les différents concepts développés ci-après sur le véhicule, nous avons formulé les restrictions suivantes :

– dans cette première version, le seul organe de commande du véhicule utilisé pour asservir la vitesse est le régulateur de vitesse : ceci limite bien entendu la plage de fonctionnement du dispositif aux capacités de frein moteur du véhicule mais il n'était pas envisageable, dans le cadre de ces travaux, d'intervenir

simultanément sur le dispositif de freinage,

- de cette première hypothèse découle directement la plage de fonctionnement de l'assistance : l'asservissement ne pourra s'opérer que pour des allures supérieures à 40 km/h (limite basse de fonctionnement du CC). Ceci simplifie considérablement la conception d'un tel système, puisque Fritz [FRI96] mentionne qu'il est, du fait du caractère non-linéaire du véhicule, délicat de mettre en œuvre un dispositif fonctionnant sur l'ensemble de la plage de vitesse,
- nous considérons que le véhicule évolue sur une route plane, et nous nous limitons donc à une action de commande dans le plan (x, y). Certains auteurs ont cependant abordé le problème de l'asservissement de vitesse avec prise en compte des variations du profil [DAM81],
- le système étant dépendant du profil du conducteur, nous supposons que celui-ci a été identifié au préalable par des méthodes abordées dans le chapitre 1 : les niveaux de vitesse, d'accélération (freinage, accélération mais aussi accélération transversale) sont fortement liés au conducteur et doivent donc être considérés,
- nous considérons que les conditions de roulage (profil routier, conditions météorologiques, état du véhicule...) permettent l'utilisation du système d'assistance.

4.4. Estimation des sollicitations longitudinales

Afin d'informer le conducteur d'une vitesse inapropriée à une manœuvre imminente, il est nécessaire de convenablement analyser l'ensemble des paramètres de la situation. Le principal résultat de cette interprétation est, dans le cadre du régulateur longitudinal de NAICC, la vitesse de consigne avec laquelle le conducteur peut négocier la tâche de conduite sans danger. A partir de la vitesse de consigne et de celle du véhicule, du potentiel de freinage et du niveau de décélération admis par le conducteur, la phase de freinage est caractérisée (cf. §4.4.2) : **le module de prédiction détermine la distance à laquelle le freinage doit débuter afin d'atteindre l'entrée de courbe avec la vitesse prédéfinie**. En réitérant cette opération sur l'ensemble du parcours effectué par le véhicule, le profil de vitesse fonction du parcours mais aussi fonction de l'évolution temporelle du véhicule est obtenu [LAU00b] : suivant la vitesse du véhicule, les phases de freinage et de réaccélération établies par l'aide à la conduite seront différentes.

Dès lors, la vitesse de consigne n'est pas uniquement fonction des caractéristiques de la conduite à un instant donné (vitesse, accélération...) mais également de l'évolution temporelle de celles-ci. Par conséquent, le dispositif doit être en mesure de traiter différents scénarios dont le caractère temporel est vital. Ces scénarios sont synthétisés suivant 4 étapes :

- la conduite en ligne droite : le dispositif agit comme un régulateur classique, en maintenant la vitesse de consigne,
- les phases de freinage : à l'approche des virages afin d'atteindre la vitesse de référence,
- la prise de virage : à vitesse constante,
- l'accélération en sortie de courbe : pour rejoindre la vitesse de consigne qu'utilise le système lorsqu'il se comporte en CC classique.

Un outil adapté pour la gestion séquentielle de scénarios comme ceux-ci sont les automates d'états finis. Ils sont particulièrement intéressants dans ce cas de figure du fait de l'importance du caractère séquentiel des évènements. Avant de se consacrer en détail à la structure de l'automate implémenté, nous présentons les solutions envisageables pour déterminer la vitesse de consigne ainsi que la caractérisation de la phase de freinage, si celle-ci s'avère nécessaire.

4.4.1. Estimation de la vitesse de consigne

4.4.1.1. Modèle de Damianoff

Une solution consiste à utiliser le modèle de la vitesse en courbe défini par Damianoff [DAM81], et exprimé par la relation (4.1) :

$$V_{ref} = \left(202.33 - 104.7 \cdot \cosh \frac{s'+1}{10}\right) \cdot \tanh \frac{R'}{64 + 0.6 \cdot R'^{0.99}} + 6.375 \cdot \tanh\left[1.1 \cdot (B_F - 7.7)\right] \quad (4.1)$$

$$R' = R + (0.4 \cdot B_F - 1.75) \cdot \cos \frac{\frac{\alpha}{2}}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (4.2)$$

$$s' = \left[1 - e^{-(0.014 \cdot R')^3}\right] \cdot s \quad (4.3)$$

où les différentes variables ont pour signification :

Grandeur	Signification	Grandeur	Signification
R	Rayon de courbure	R'	Rayon de courbure modifié
s	pente	s'	pente modifiée
α	secteur angulaire	B_F	Largeur de la voie

TAB. 4.1.: Variables de calcul du modèle de DAMIANOFF [DAM81]

Les grandeurs R' et s' caractérisent la tendance des automobilistes à couper un virage. Si cette solution permet de tenir compte des variations longitudinales du profil routier, elle possède un inconvénient considérable aux yeux de notre objectif : **elle ne fait intervenir aucun paramètre traduisant simplement le profil du conducteur**. Ainsi, cette formulation permet de façon absolue de définir une vitesse moyenne de passage dans une courbe donnée.

La solution que nous proposons consiste à définir la consigne de vitesse suivant, d'une part la trajectoire générée par polynômes polaires, et d'autre part en considérant un critère relatif au conducteur.

4.4.1.2. Critère de sécurité et de confort de conduite

Dans le chapitre 1, il a été mentionné que le conducteur perçoit de manière précise les accélérations qu'il subit ainsi que les vitesses de rotation. Il perçoit cependant de manière moins précise les vitesses linéaires. Par ailleurs, la modélisation trajectographique du conducteur effectuée dans le chapitre 3 a montré que, pour des manœuvres telle la prise de virage, trajectoire et vitesse sont couplées. Le choix de la trajectoire et de la vitesse appropriée est fondé principalement sur un critère de confort (et intrinsèquement de sécurité) de conduite, évalué suivant les sollicitations latérales auxquelles est soumis le conducteur. La notion subjective de confort est étroitement liée à la sécurité de conduite. Il est donc naturel de baser la détermination de la vitesse de référence sur l'information d'accélération latérale [GAL00], celle-ci étant un indicateur précieux du style de conduite ("inexpérimenté", "très expérimenté"...). Le modèle de trajectoire employé est particulièrement intéressant à ce titre. Effectivement, nous avons évoqué dans le paragraphe relatif aux extensions des SPP les travaux de PINCHARD. Ceux-ci concernent la possibilité d'utiliser des contraintes cinématiques et dynamiques pour définir la trajectoire adéquate. Ces contraintes expriment en particulier la courbure maximale de la trajectoire en fonction de l'accélération transversale maximale admissible :

$$\kappa_{max} = \frac{\gamma_{T_{max}}}{v_{min}^2} \quad (4.4)$$

Le principe du critère de confort consiste à déterminer la vitesse minimale v_{min} du véhicule, suivant la trajectoire de référence et un seuil d'accélération transversale maximal fixé. La vitesse de consigne ainsi obtenue correspond en réalité à celle qu'aurait le véhicule au point de la trajectoire où la courbure est maximale. Néanmoins, dans une première approche de l'asservissement longitudinal, nous l'utilisons comme consigne pour l'ensemble du virage, négocié à vitesse constante. La valeur de $\gamma_{T_{max}}$ reflète le niveau de confort recherché par le conducteur. Cette solution garantit ainsi une vitesse adéquate à la situation de conduite, au véhicule et au conducteur.

4.4.2. Modélisation de la phase de freinage

Après la détermination de la vitesse de référence nécessaire pour la négociation de la courbe, il convient de caractériser la phase de freinage. Cela consiste en la détermination de la distance de freinage, donc du point du

profil routier à partir duquel le véhicule doit décélérer pour atteindre l'entrée du virage avec la vitesse requise.

L'approche proposée dans NAICC est fondée sur le calcul d'un indicateur de sécurité : le "Time-to-Collision".

4.4.2.1. Notion de "Time-To-Collision"

Le "Time-To-Collision" (TTC) est défini comme étant, à un instant t, la durée restant avant la collision entre deux véhicules, considérant leur trajectoire et vitesse respectives à cet instant.

Dans ses travaux, Lee [LEE76] affirme que le conducteur, pour déterminer sa phase de freinage, ne se focalise pas sur la différence de vitesse entre son véhicule et celui qui le précède, ni même sur l'accélération ou la distance. Selon lui, l'automobiliste utilise uniquement une information découlant de l'analyse visuelle de la situation. Cet indicateur correspond à la notion temporelle du TTC. En posant cette hypothèse, Van der Horst [HOR90] montre plus tard que le TTC permet, d'une part de calculer le moment à partir duquel il convient de freiner, et d'autre part de contrôler la phase de freinage.

L'indicateur que nous proposons représente la distance de freinage nécessaire pour atteindre la vitesse prédéterminée. Il découle directement de la définition du TTC, mais est adapté au calcul d'une distance entre un véhicule et le début d'une courbe (et non entre deux véhicules se suivant).

4.4.2.2. Principe du véhicule virtuel

Par définition, le TTC s'applique à deux véhicules circulant dans la même direction avec des vitesses différentes. Afin d'appliquer cette technique à la caractérisation de la phase de freinage, nous considérons que se situe, à l'entrée du virage, un véhicule dont la vitesse correspond à la vitesse de référence V_{virage} nécessaire pour la négociation de la courbe (cf. figure 4.3). Nous cherchons alors à définir la distance de freinage nécessaire pour atteindre ce véhicule virtuel avec la vitesse V_{virage}. En fait, le véhicule virtuel correspond à la prévision que fait le conducteur de sa propre situation de conduite à l'entrée du virage.

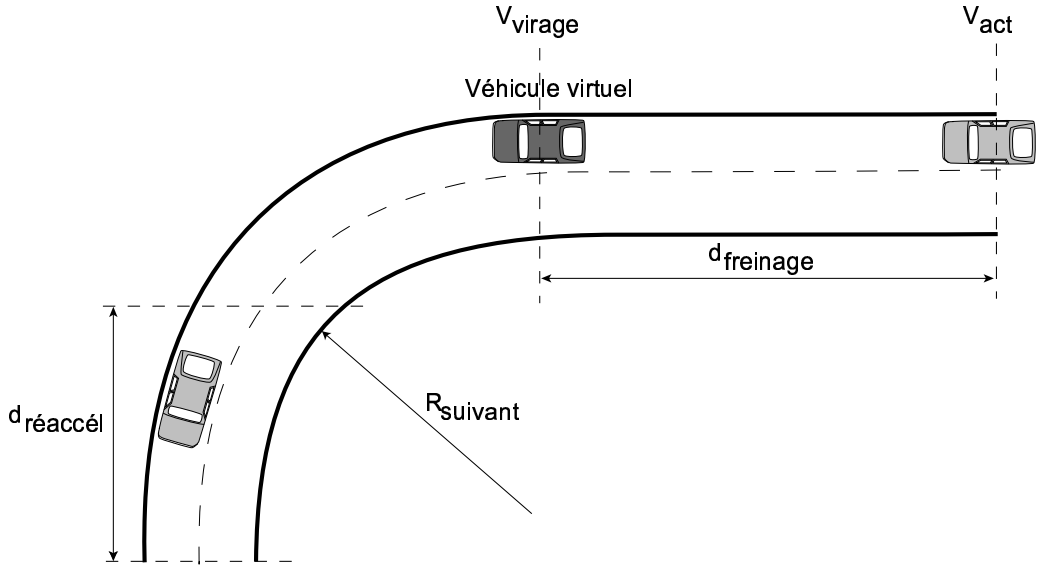


Fig. 4.3. : Caractérisation de la phase de freinage

En considérant par conséquent une décélération constante[3] a_f durant l'intégralité de la phase de freinage, la vitesse de référence peut être définie en fonction de la durée de freinage (TTC) T_f et de la vitesse du véhicule V_{act} au début de la phase de freinage :

$$V_{virage} = a_f \cdot T_f + V_{act} \tag{4.5}$$

[3]La plupart des ACC actuellement sur le marché procèdent de la sorte, le niveau de décélération étant compris entre -2 et -2.5m/s^2 [PRE00]. Ces valeurs correspondent au niveau de décélération appliqué par la majorité des conducteurs [IIJ00].

La distance de freinage d_f (qui est aussi la distance parcourue par le véhicule durant le temps T_f) s'obtient simplement par :

$$d_{freinage} = \frac{1}{2} \cdot a_f \cdot T_f^2 + V_{act} \cdot T_f \tag{4.6}$$

En substituant dans (4.6) T_f par son expression déduite de (4.5), on obtient :

$$d_{freinage} = V_{act} \cdot \frac{V_{virage} - V_{act}}{a_f} + \frac{1}{2} \cdot a_f \cdot \left(\frac{V_{virage} - V_{act}}{a_f} \right)^2 \tag{4.7}$$

ce qui peut finalement s'écrire, en posant $\Delta V = V_{virage} - V_{act}$:

$$d_{freinage} = V_{act} \cdot \frac{\Delta V}{a_f} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V^2}{a_f} \tag{4.8}$$

La détermination de la phase de freinage est fondée sur le critère temporel du TTC. En fonction de celui-ci, il convient de définir la réserve de temps dont dispose le conducteur avant d'entamer réellement la phase de négociation du virage. Notre application étant basée sur la localisation du véhicule et donc sur une notion de distance, nous parlons de réserve de distance plutôt que de réserve temporelle. Lorsque celle-ci est nulle, une nouvelle séquence de conduite débute : il s'agit du freinage. Ce dernier s'effectue alors jusqu'à ce que la vitesse de référence soit atteinte. Ce séquencement des différentes phases de conduite dont les passages des unes aux autres sont conditionnés, peut aisément être représenté par un automate d'états finis.

4.5. Modélisation de l'activité longitudinale par un automate d'états finis

La structure de l'automate régissant la régulation longitudinale est illustrée sur la figure 4.4 et dérive du modèle hybride du conducteur développé par MAJJAD [MAJ97]. Ce modèle, également fondé sur un automate, décrit la partie longitudinale de l'asservissement d'un véhicule. Pourtant les deux approches sont totalement antagonistes et notamment au niveau de l'objectif recherché. Dans ses travaux, MAJJAD a pour but de reproduire au mieux (voire d'imiter) le comportement de différentes classes de conducteurs, en incluant les aspects cognitifs. Notre objectif réside dans la réalisation d'une tâche du niveau de guidage par un dispositif automatique qui puisse soulager le conducteur.

Nos travaux se distinguent également du fait de leur caractère anticipatif fort : dès que le véhicule entre dans une nouvelle portion de route (par exemple une ligne droite), il utilise la base de données pour immédiatement identifier la prochaine phase de conduite importante (virage). Cette tâche est effectuée quelque soit la distance (ou le temps) qui sépare le véhicule de la situation détectée. Le modèle cognitif, quant à lui, a un degré d'anticipation fortement dépendant de l'expérience du conducteur qui peut donc s'avérer faible pour des conducteurs débutants.

Tel qu'élaboré par MAJJAD, l'automate ne permet de traiter que des transitions entre des lignes droites et des virages et ne peut considérer deux courbes successives. Par conséquent, le domaine de validité du modèle hybride est restreint à des profils d'évolution simples. Enfin, les résultats de simulation proposés ne font état que de profils routiers proches des conditions de conduite sur autoroutes (rayon de courbure supérieur à 275 m et secteur angulaire faible) où les variations de vitesse demeurent faibles. Néanmoins, dans ces essais, les conditions extérieures (adhérence, conditions météorologiques) sont prises en compte.

L'automate que nous proposons synthétise les 4 étapes mentionnées précédemment (la conduite en ligne droite, la phase de freinage, la négociation du virage et la réaccélération en sortie). Nous choisissons volontairement de ne pas faire figurer dans cette représentation l'état d'initialisation, où le véhicule se trouve à l'arrêt. Cet état ne fait pas partie du scénario que nous désirons représenter, c'est-à-dire la stratégie de négociation de virage. L'état d'initialisation n'est utile que pour des raisons de programmation de l'automate.

Le véhicule, initialement à l'arrêt, débute à l'état 1 "***Accélération***". Il est à noter que cet automate est fondé sur une représentation du profil routier qui ne considère que deux types de profils : des virages et des lignes droites. Si le rayon de la section vers laquelle se dirige le véhicule est non-nul, cette section est un virage (même

si les caractéristique de celui-ci n'entraîne pas obligatoirement une manœuvre d'approche telle que décrite ci-dessus) et une ligne droite dans le cas contraire[4]. La description présentée dans la section suivante synthétise le fonctionnement global de l'automate. On considère pour cela, que l'ensemble des grandeurs permettant de définir la commande (potentiels d'accélération ou de décélération, accélération transversale maximale...) est connu et correspond aux habitudes du conducteur. Le fonctionnement de cet automate est illustré au chapitre 6 par des exemples où ces grandeurs ont été définies selon le potentiel du véhicule utilisé ainsi que le profil du conducteur.

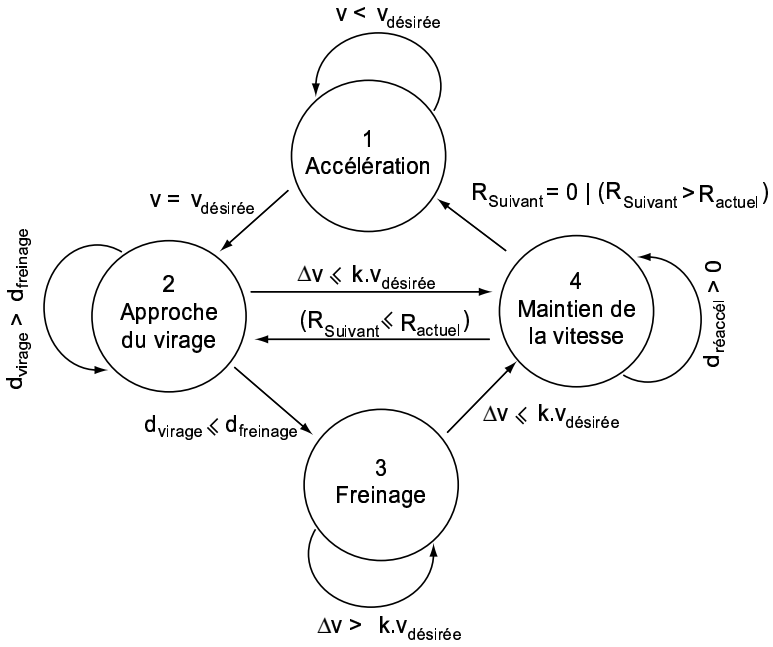


FIG. 4.4. : Automate de la régulation de vitesse

La notion de distance de contrôle représente le fondement de cette structure. La majorité des actions sont entreprises suite à des tests effectués par exemple sur la position du véhicule par rapport à l'entrée d'une courbe, à sa sortie ou à la distance de freinage évaluée. Cette méthodologie repose clairement sur la validité de la localisation du véhicule.

Si pour l'heure NAICC ne peut agir sur l'organe de freinage, l'automate d'états finis a été conçu pour tenir compte de cette possibilité future. Dans cette première configuration, nous tenons à vérifier que les profils de vitesses générés sont en rapport avec la conduite effectivement mesurée. Ainsi, nous établirons les résultats à partir d'un potentiel de décélération qui suppose une commande des freins.

4.5.1. Entrées de l'automate

Afin de définir la stratégie de conduite appropriée à la situation détectée, l'automate d'états finis nécessite de multiples entrées. Celles-ci peuvent être regroupées suivant leurs sources respectives :

- **informations de localisation du véhicule** : ces données sont obtenues par la base de données du système d'aide et correspondent aux caractéristiques géométriques du profil routier, aux données environnementales (circulation urbaine, extra-urbaine...), à la réglementation imposée et aux distances de contrôle,
- **paramètres conducteur** : ceux-ci concernent principalement la consigne de vitesse sélectionnée par le conducteur pour la régulation de vitesse classique, et le niveau d'accélération transversale représentatif de ce conducteur. Ces différents paramètres sont considérés constants durant l'ensemble de la tâche de

[4]En toute rigueur, le rayon d'une ligne droite n'est pas nul mais infini. Nous définissons un rayon nul pour ces sections uniquement pour des raisons de programmation.

conduite même s'il a été montré que les conducteurs avaient tendance à réduire les sollicitations longitudinales et latérales avec l'augmentation de la vitesse [LEC93]. Cette hypothèse se justifie pleinement par leur faible variation lors de la conduite courante, objet de notre étude,

– **paramètres véhicule** : la définition des phases de freinage et d'accélération (en sortie de virage) nécessite de connaître la vitesse d'évolution du véhicule ainsi que les potentiels de décélération et d'accélération de celui-ci. Ces deux derniers facteurs pourront, le cas échéant, être ajustés suivant le profil du conducteur à l'aide d'un coefficient défini empiriquement.

4.5.2. Etats de l'automate

Etat 1 : "Accélération" A cet instant, le véhicule accélère afin d'atteindre la vitesse désirée. Celle-ci peut représenter la consigne enregistrée par le conducteur si cette dernière peut être atteinte avant la prochaine courbe, mais elle peut également représenter la vitesse du prochain virage dans le cas d'une succession (cf. état "Maintien de la vitesse"). La transition vers le deuxième état s'effectue lorsque la vitesse désirée est atteinte.

Etat 2 : "Approche du virage" Le dispositif identifie la prochaine phase de négociation de virage vers laquelle le véhicule se dirige. Ceci donne lieu à l'estimation de la distance séparant le véhicule de la courbe d_{virage} et de la vitesse de référence V_{virage} nécessaire pour la négocier. D'autre part, lors de cette étape est effectuée la caractérisation de la phase de freinage, définie par la distance nominale $d_{freinage}$. A ce niveau, le système d'assistance se trouve dans une phase d'attente, tant que la distance qui sépare le véhicule du virage est supérieure à la distance de freinage estimée. Lors de cette phase d'attente, la vitesse est maintenue constante jusqu'à ce que le véhicule entre dans la zone de freinage identifiée.

Etat 3 : "Freinage" Le passage à cette étape repose sur l'arrivée du véhicule dans la zone de freinage ($d_{virage} \leq d_{freinage}$). En mode de fonctionnement passif, l'assistance informe le conducteur de la nécessité de ralentir son véhicule en lui mentionnant la vitesse de consigne à titre indicatif. En mode actif (asservissement de la vitesse) et en fonction du potentiel de freinage configuré, le dispositif applique la consigne de freinage. Le freinage est maintenu tant que la différence entre la vitesse du véhicule et la vitesse désirée (qui est ici la vitesse de consigne pour le virage) est supérieure à un seuil fonction de la vitesse désirée :

$$\Delta v > k \cdot V_{\text{desiree}}$$

le coefficient k a été introduit pour tenir compte des performances du régulateur de vitesse (capacités dynamiques, temps de réponse) en mode "freinage", qui n'est pas son mode de fonctionnement habituel.

Etat 4 : "Maintien de la vitesse" Lorsque la vitesse de référence est atteinte, l'automate passe au quatrième état qui synthétise la prise de virage. A cet instant, la vitesse est maintenue constante jusqu'à quelques mètres avant la fin du virage. La réaccélération a en général lieu avant que le conducteur ait quitté le virage, dès qu'il aperçoit la sortie de celui-ci et le profil de la route qui suit. Le point de réaccélération est fortement dépendant du caractère du conducteur (cf. analyse trajectographique). Il est représenté dans notre cas par un paramètre de configuration, de la même manière que le seuil d'accélération transversale toléré par exemple.

A ce stade deux solutions sont possibles :

1. le virage qu'il quitte est suivi d'une ligne droite (qui permet donc au système de repasser en fonctionnement de CC classique) ou d'un virage dont le rayon de courbure est supérieur au précédent : le dispositif peut réaccélérer afin d'atteindre la vitesse désirée,
2. le virage est immédiatement suivi d'une seconde courbe et l'automate passe directement à l'étape 2 et réitère le cycle.

4.5.3. Sorties générées

Deux types de sorties sont générées par l'automate d'états finis. On dénombre d'une part les **sorties d'information du conducteur** qui pour l'heure se limitent aux caractéristiques de la zône de freinage (début de freinage), à la distance qui le sépare de la courbe et bien entendu à la vitesse de consigne de celle-ci (cf.

chapitre 6). D'autre part, l'automate définit les **signaux de commande du régulateur de vitesse**. Des ordres d'accélération/décélération identiques à ceux générés par le module de télécommande (cf. figure 4.1) lors de l'utilisation standard du CC sont envoyés de façon répétée au régulateur de vitesse. Un correcteur Proportionnel Intégral implémenté dans le régulateur CC lui permet d'assurer sa fonction. Cette solution ne peut cependant être définitive puisqu'elle limite considérablement la plage de fonctionnement du système NAICC. L'utilisation "détournée" (remplacement du module de télécommande par le système NAICC) du régulateur de vitesse a nécessité le développement (matériel et logiciel) d'un module d'interfaçage présenté dans le chapitre 6 et dont le rôle est :

- de connecter, par l'intermédiaire d'un micro-contrôleur C167 d'Infinéon, le CC au bus CAN,
- de générer, à partir des ordres d'accélération et de décélération déterminés par l'automate d'états finis, les signaux de commande de l'actionneur de l'angle papillon.

L'implémentation sous Matlab/Simulink du régulateur de vitesse assisté par un dispositif de localisation est illustré dans le chapitre 6. Ce chapitre décrit également l'instrumentation relative à cet axe de recherche de NAICC. Enfin, le lecteur pourra y trouver, en plus des méthodologies de validations employées, des résultats de simulations et d'essais en conditions réelles.

4.6. Conclusion

Ce chapitre s'est attaché à décrire les principes retenus pour l'axe longitudinal du projet NAICC. L'extension de l'ACC, par couplage avec le système de localisation développé, ouvre de nouvelles perspectives d'assistance à la conduite. A la perception jusqu'à présent locale, et limitée au trafic proche du véhicule (détection du véhicule qui précède), nous proposons d'ajouter une perception globale de l'environnement de conduite et notamment du profil routier. Dès lors, un tel dispositif peut réguler la vitesse du véhicule en fonction des autres usagers mais également, lorsque les conditions de circulation le permettent, en fonction des caractéristiques du profil routier (virages, intersections, conditions de visibilité...).

Un automate d'états finis est employé pour décrire quatre phases représentatives des actions du conducteur lors de la négociation d'une courbe : l'approche du virage, le freinage, la prise de virage et enfin, la sortie de virage. L'utilisation de la base de données étendue permet de définir les distances de freinage requises.

C'est dans le cadre de cet axe de recherche que le véhicule expérimental du MIAM a été totalement instrumenté, afin de pouvoir valider les différents concepts dans des conditions de conduite les plus réalistes possible. Un régulateur de vitesse classique a par conséquent été interfacé avec le système d'acquisition et de commande, qui constitue en quelque sorte le cœur du système NAICC. D'un point de vue logiciel, cette démarche a fait l'objet du développement d'un modèle sous forme de schéma-blocks à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Ce dernier est le support, à la fois des simulations, mais aussi des expérimentations menées avec le véhicule (cf. chapitre 6).

L'objectif global du projet NAICC est la mise en œuvre d'un dispositif de supervision capable, tel un système ABS ou ESP, de détecter et corriger les écarts du conducteur de manière transparente pour celui-ci (le système analyse constamment la situation de conduite et intervient le cas échéant). Pour l'heure, NAICC adopte le principe du régulateur de vitesse. Le conducteur est responsable de son utilisation, il choisit d'enclencher et de déclencher le système lorsqu'il estime que des conditions d'utilisation convenables sont réunies.

Finalement, la volonté de développer un tel dispositif demande de s'intéresser au comportement du conducteur. Afin d'être accepté par le conducteur, le DAC doit reproduire da manière fidèle son comportement : niveaux d'accélérations, de freinages... Or, ces critères sont dépendants d'un grand nombre de facteurs (cf. chapitre 1) inhérents au conducteur, aux conditions de circulation, aux conditions météorologiques.... C'est pourquoi, nous choisissons dans un premier temps, sur la base des nombreuses études d'acceptabilité effectuées pour les systèmes ACC, de formaliser le comportement de la majorité des conducteurs (niveau d'accélération et freinage constants...). Par la suite, et avec l'appui par exemple des techniques d'analyses comportementales, le système pourrait s'adapter au conducteur, si celui-ci n'est pas identifié comme potentiellement dangereux...

Troisième partie .

Validation des concepts développés

Chapitre 5

Localisation multisensorielle d'un véhicule routier

"*La véritable culture, celle qui est utile, est toujours une synthèse entre le savoir accumulé et l'inlassable observation de la vie.*"

Francesco Alberoni

Sommaire

5.1. Introduction 98
5.2. Principes généraux de la fusion de données 98
5.2.1. Modèle fonctionnel 98
5.2.2. Architectures de fusion 99
5.3. Méthodes de fusion de données multisensorielles 102
5.3.1. Théorie ensembliste 102
5.3.2. Approche statistique : le filtrage de Kalman 103
5.3.3. Approche statistique : alternative au filtre de Kalman 105
5.3.4. Approche probabiliste : le filtrage particulaire 105
5.4. Fusion de données pour le positionnement d'un véhicule routier 106
5.4.1. Principe de positionnement 106
5.4.2. Sélection des informations pour le positionnement 107
5.4.3. Choix de l'estimateur 108
5.4.4. Théorie du filtrage de Kalman 108
5.4.5. Processus non-linéaire : filtre de Kalman étendu 110
5.4.6. Modèle d'évolution du véhicule 111
5.5. Architecture hybride développée 112
5.5.1. Architecture d'estimation et de fusion 113
5.5.2. Estimation de l'angle et de la vitesse de lacet 114
5.5.3. L'EKF pour la fusion DGPS-mesures proprioceptives 116
5.6. Localisation et modélisation du profil routier 118
5.6.1. Contexte 118
5.6.2. Courbes de Bézier 120
5.6.3. Modélisation du profil routier 122
5.6.4. Localisation par corrélation cartographique 123
5.7. Conclusion 123

5.1. Introduction

La localisation du véhicule revêt une part importante dans le projet NAICC : sans localisation précise, il est inutile, voire dangereux, d'établir un profil de vitesse, de trajectoire ou d'informer le conducteur d'une éventuelle situation critique. Dès lors, la fiabilité du système d'aide à la conduite est fortement conditionnée par la précision, d'une part du module de positionnement, et d'autre part de la fidélité de la cartographie du profil routier.

La tâche de localisation reste cependant délicate à mettre en œuvre. Elle requiert en outre l'utilisation de plusieurs capteurs, souvent de nature différente (**proprioceptifs** et **extéroceptifs**) qu'il convient de combiner afin d'obtenir un système plus performant et plus robuste que s'il n'était basé sur un capteur unique. La fusion d'informations de différents capteurs se base principalement sur les notions de **redondance** et de **complémentarité** des sources d'informations [ARN93]. L'intérêt est de palier aux défauts inhérents à chaque capteur (imprécision, inexactitude...).

Ce chapitre a pour objet dans un premier temps de présenter succintement les principes liés à la fusion de données multisensorielles. Dans un deuxième temps, nous aborderons la méthode de localisation développée et intégrée sur le véhicule expérimental. Celle-ci est constituée d'un module de positionnement (fusionnant les informations d'un capteur absolu avec celles de capteurs relatifs) et d'un module de corrélation cartographique ("**Map-Matching**") architecturé autour d'une base de données d'une précision accrue. L'utilisation de courbes paramétriques pour la modélisation du profil routier garantit une fiabilité de discrétisation suffisante pour envisager de nouveaux DAC. Très largement répandu dans les applications de localisation, le filtre de Kalman étendu a été retenu pour garantir le positionnement du véhicule notamment du fait des performances qu'il procure[1] en calcul embarqué et de sa facilité d'implémentation.

5.2. Principes généraux de la fusion de données

Selon [JOU99], "*la fusion de données est un domaine qui décrit les méthodes et techniques numériques permettant de mélanger des informations provenant de sources différentes, afin d'extraire une estimation ou une décision la plus précise et la plus robuste possible*". Cette définition illustre bien le large domaine d'application de la fusion et les différents niveaux de fusion possibles (l'estimation étant le résultat d'une fusion de bas niveau, alors que la décision demeure le niveau le plus élevé).

L'exemple le plus évocateur de ce qu'est la fusion de données n'est autre que l'homme. Celui-ci utilise des informations provenant de ses différents organes sensoriels (la vue, le toucher, l'odorat, le goût et l'ouïe). Il dispose d'une base de connaissances (l'expérience) afin de déterminer les caractéristiques de son environnement ou prendre une décision.

Cette section ne prétend pas être un état de l'art complet de ce domaine. Elle traite uniquement des principes et théories les plus fréquemment utilisés dans le cadre du positionnement du véhicule.

5.2.1. Modèle fonctionnel

Un modèle fonctionnel pour la fusion de données est représenté par la figure 5.1 [ANT95]. Il a été développé par le *Data Fusion Group* (DFG) du *Joint Directors of Laboratory* (JDL). Ce modèle définit à la fois une vision de la fusion de données et une architecture pour faciliter la communication entre les membres de la communauté scientifique, les industriels et les utilisateurs.

Ce modèle est constitué de 4 niveaux d'intervention. Les capteurs fournissent des informations physiques sur les objets faisant l'œuvre de la fusion de données. Habituellement ces informations sont relatives à un seul objet.

1. Le niveau 1, ***"Object Refinement"***, assure les tâches suivantes :
   - Détection d'objet,
   - Association des nouvelles détections avec des objets connus (observés précédemment par le même capteur ou par d'autres),

[1] et cela même si le système est régi par des relations non-linéaires ne répondant pas au formalisme général de l'estimateur de Kalman.

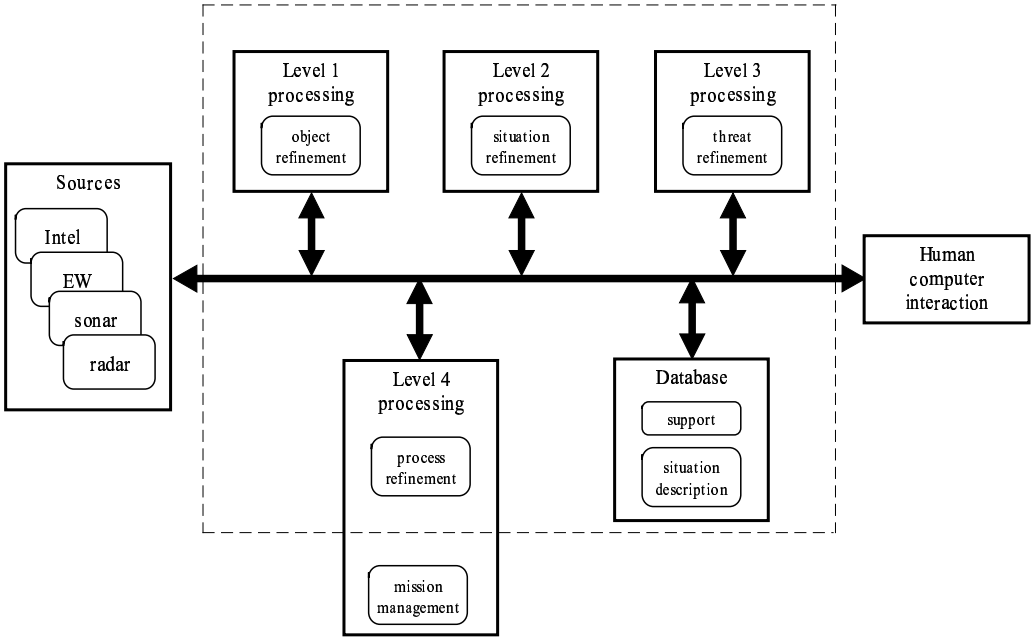


FIG. 5.1. : Modèle fonctionnel de la fusion de données selon [ANT95]

- Analyse des paramètres de l'objet, tel que sa vitesse, sa position. . . ,
- Identification de l'objet et classification.

2. Le niveau 2, **"S*ituation Refinement*"**, fournit une interprétation de plus haut niveau, relative aux objets détectés au niveau 1, ainsi qu'à leurs états. Ce niveau est essentiellement basé sur une logique de règles et dépend fortement de l'architecture générale du procédé de fusion (cf. §5.2.2).
3. Le niveau 3, ***"Threat Refinement"***, est l'organe de décision du procédé de fusion. Si l'on prend l'exemple du jeu d'échec (procédé de fusion par excellence. . .), le niveau 3 analyse les forces en présence, les intentions de l'adversaire ainsi que ses points faibles, en évaluant les effets à court et à long terme du déplacement d'une pièce, dans le cadre de la stratégie globale. Ce niveau est réellement à l'interface entre la fusion de données et le contrôle-commande.
4. Le niveau 4, ***"Process Refinement"***, contrôle la globalité du procédé de fusion. Il peut agir sur tous les organes, depuis le jeu de capteurs jusqu'aux lois de commande du système, et ce en respectant les critères de fonctionnement établis au départ.

Par ailleurs, le niveau 1 apporte les avantages suivants :

- Possibilité d'utilisation de capteurs ne fournissant seulement qu'une partie de l'information utile,
- Possibilité d'utilisation de capteurs répartis, pour augmenter la plage de couverture et la précision du système de mesures,
- Redondance des capteurs de la chaîne d'acquisition.

La base de données sert de stockage aux informations nécessaires dans les différents niveaux. Son fonctionnement sera abordé dans le paragraphe consacré aux architectures de haut niveau.

Remarque : WALTZ [WAL90] *présente un modèle simplifié à deux niveaux regroupant les niveaux deux à quatre. Même s'il est courant de rencontrer dans la littérature ce modèle dégradé, celui à quatre niveaux fait référence, dans la mesure où il est issu d'un organisme officiel.*

5.2.2. Architectures de fusion

Le paragraphe précédent a introduit le formalisme utilisé afin de spécifier les différents niveaux fonctionnels d'intervention de la fusion de données. Cette architecture a entre autre montré que le degré d'abstraction et de

représentation des données fusionnées croît suivant le niveau considéré. Cependant, cette formalisation ne tient pas compte des solutions technologiques utilisées lors de la réalisation d'un système réel : il est donc nécessaire de s'intéresser aux architectures des procédés de fusion.

5.2.2.1. Architectures de bas niveau

Ces architectures font référence au niveau fonctionnel 1 : ***"Object Refinement"***. Il existe plusieurs architectures différentes, synthétisées dans l'ouvrage de WALTZ [WAL90] et représentées par les figures 5.2 à 5.4. Ce niveau de fusion s'appuie principalement sur les théories de traitement du signal.

Architecture centralisée

Dans le cas d'une architecture centralisée, les données brutes arrivent sur un calculateur central (cf. figure 5.2). L'avantage de cette architecture est que l'estimation des paramètres du modèle sur lequel s'effectue la fusion de données est toujours la meilleure, du fait que les données arrivent en ayant subi uniquement une étape de pré-traitement (filtrage, amplification...). Cependant, elle nécessite de grosses ressources en terme de calcul ainsi qu'un bus suffisamment robuste pour assurer le transport de données sans dégradation. De plus, en cas de panne du calculateur central, tout le processus de fusion est stoppé.

*Remarque : Le bloc d'**"Synchronisation & Association"** effectue une datation d'événements pour assurer une cohérence temporelle des données lors de la fusion.*

Architecture décentralisée ou autonome

Cette architecture, présentée sur la figure 5.3, optimise la sécurité de fonctionnement face aux pannes, dans la mesure où le calculateur central est assisté de calculateurs propres à chaque capteur. Ces calculateurs effectuent une estimation des paramètres d'un modèle de fusion intermédiaire, en fonction des données recueillies. Il est donc possible de spécifier des algorithmes de fusion différents pour chaque capteur. Les résultats des fusions intermédiaires sont ensuite utilisés pour l'estimation finale. Mais, du fait des pré-estimations effectuées, cette architecture donne, en fin de chaîne, de moins bons résultats que l'architecture précédente.

Architecture hybride

Les données utilisées pour l'estimation sont les données brutes, directement issues des capteurs, ainsi que des données ayant déjà subi une phase de pré-estimation. Cette architecture tend à limiter les défauts inhérents aux architectures centralisée et autonome, tout en conservant leurs qualités, à savoir la robustesse du processus face aux pannes et la précision de l'estimation. De fait, elle intègre les structures centralisée et décentralisée présentées initialement (cf. figure 5.4).

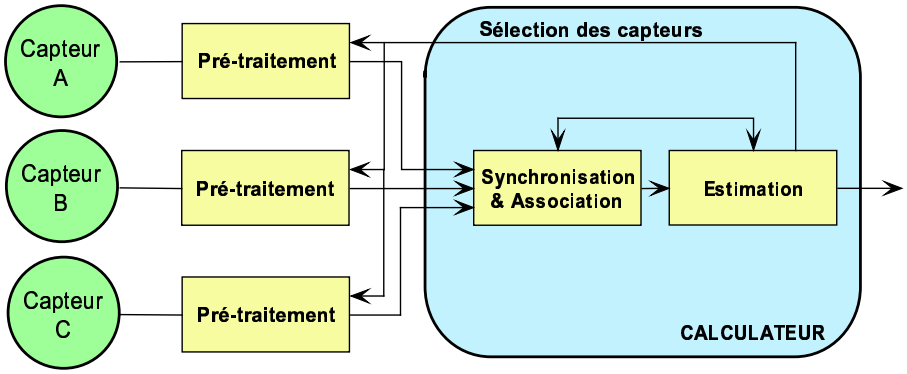


FIG. 5.2. : Architecture centralisée de fusion

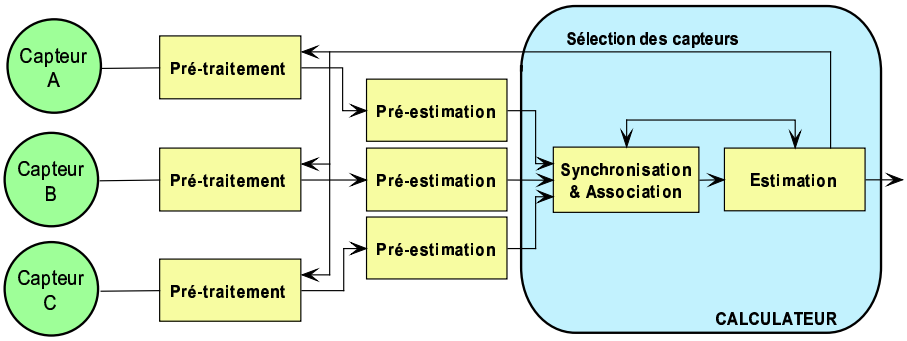


FIG. 5.3. : Architecture autonome de fusion

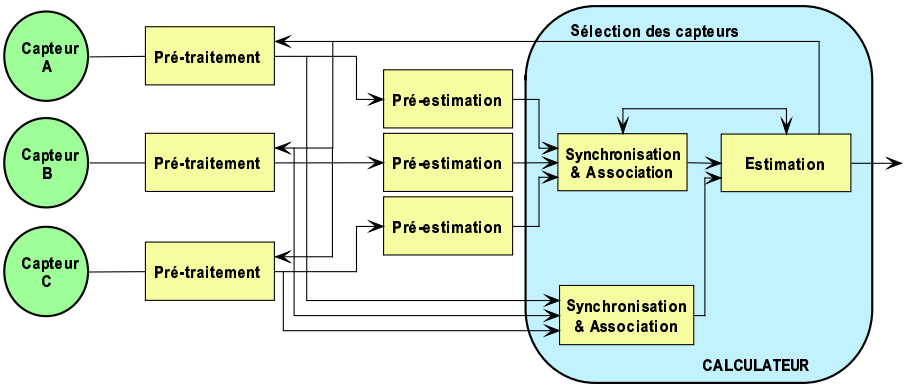


FIG. 5.4. : Architecture hybride de fusion

5.2.2.2. Architecture de haut niveau

Dans les niveaux de fusion deux à quatre, des concepts de haut niveau, i.e. ayant un haut degré d'abstraction, sont manipulés. Pour reprendre l'exemple de WALTZ [WAL90], dans le domaine militaire, avant de lancer l'offensive sur un avion ennemi, il faut tenir compte de l'environnement (météo, populations civiles...), des forces disponibles mais également du contexte géopolitique.

Les techniques utilisées dans les architectures de bas niveau sont inadaptées pour gérer ce type de données, et l'on fait alors appel aux méthodes utilisées en intelligence artificielle et notamment les systèmes experts. Un système expert est un ensemble de règles d'évolution associées à une base de connaissances. Cependant, dans des cas complexes comme celui énoncé plus haut, il est nécessaire de faire intervenir plusieurs systèmes experts. Le concept du "***blackboard***" a été développé dans cette optique.

Le modèle "***blackboard***" est basé sur un modèle de raisonnement distribué, c'est-à-dire que chaque expert participe à la solution de façon asynchrone, de la même manière que les humains utiliseraient un tableau pour résoudre un problème.

Un modèle "***blackboard***" est composé de trois modules :

- Les **sources de connaissances** qui sont basées sur des ensembles de règles ou de procédures,
- La **base de données** "***blackboard***" qui rassemble l'ensemble des solutions sous une forme hiérarchisée. Les sources de connaissances modifient cette base de données pour arriver à une solution, ou à un ensemble de solutions, considérés comme acceptables,
- Le **moniteur** qui est le module permettant de contrôler les changements dans la base de données "***blackboard***".

Un des points les plus importants de cette architecture est les différentes bases de données constituant le

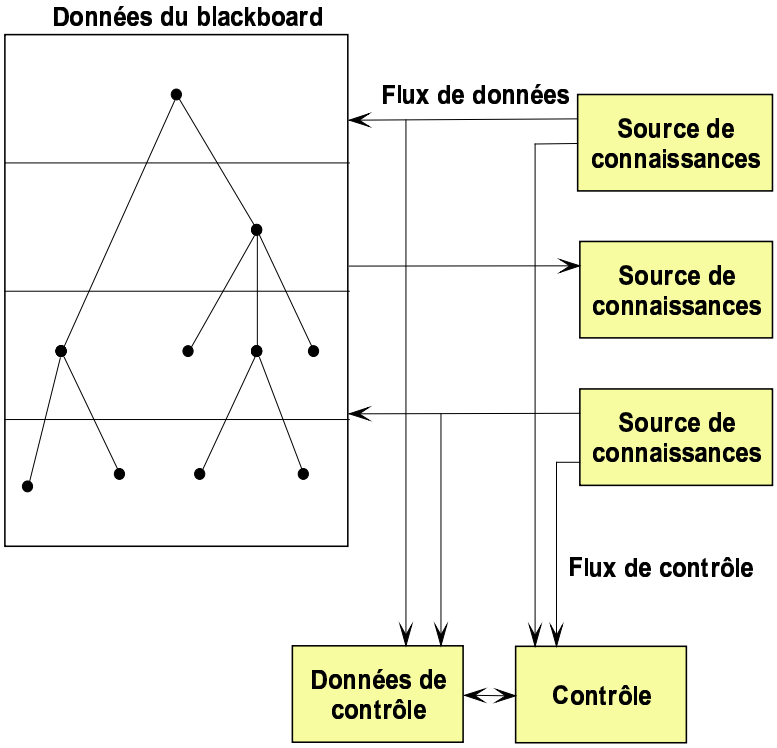


FIG. 5.5. : Modèle "***blackboard***"

"***blackboard***". C'est en grande partie d'elles dont dépendent à la fois la rapidité et l'intégrité du système.

5.3. Méthodes de fusion de données multisensorielles

Généralement, sous le terme "*fusion*" est regroupé l'ensemble des méthodes permettant d'effectuer l'association des données multi-capteurs puis l'estimation, la classification ou la prise de décision [ARN93]. Ainsi, pour chaque étape considérée, différents formalismes et théories sont envisageables. Par le suite, nous ne définirons que celles ayant directement attrait à notre application, i. e. l'hybridation de données multisensorielles pour la localisation d'un véhicule. Le lecteur intéressé par les méthodes de fusion de plus haut niveau pourra se référer aux ouvrages [BON01b, JOU99] dans lesquels ces notions sont synthétisées. Les principaux formalismes pour la fusion de haut niveau sont les théories probabiliste, de l'évidence [DEM68, SHA76] ou encore la théorie des possibilités [DUB88].

Les méthodes présentées ci-dessous font toutes référence à la fusion de données de niveau 1 du modèle fonctionnel, c'est-à-dire de la fusion s'opérant au niveau "signal".

5.3.1. Théorie ensembliste

La théorie ensembliste consiste à trouver, connaissant le modèle d'évolution d'un processus et les observations $\boldsymbol{z(k)}$, k=1,...,N, le plus petit ensemble de l'espace d'état contenant la valeur réelle mais inconnue $\boldsymbol{x(j)}$ et satisfaisant à la fois les équations du modèle et les niveaux de bruits. Contrairement aux méthodes statistiques (filtrage de Kalman...), ces méthodes ne nécessitent, hormis les bornes de leurs domaines de validité, aucune connaissance statistique des grandeurs mises en œuvre.

La fusion se déroule en 2 étapes :

– Phase de **prédiction** : à partir de l'état à l'instant t, on prédit l'état à l'instant t+1 :

$$X(t+1) = f(X(t), U(t)) \tag{5.1}$$

– Phase d'**estimation de l'état** : en tenant compte des mesures effectuées à l'instant $t+1$ ($X(t+1|t)$), il est possible d'estimer l'état courant. Mathématiquement, cela se traduit par la relation :

$$X(t+1|t+1) = h^{-1}(Y(t)) \bigcap X(t+1|t) \tag{5.2}$$

sachant que $Y(t) = h(X(t))$.

Cette méthodologie fournit un ensemble où se trouve nécessairement la solution cherchée, et cela même dans le cas d'un processus non-linéaire. Néanmoins, il convient de noter que lorsque le processus étudié est de dimension importante, les temps de traitement nécessaires à une bonne approximation sont considérables. Bouron a développé cette approche pour l'estimation d'état du véhicule STRADA [BOU02] : l'objectif de ces travaux est de définir la configuration (position et cap) du véhicule et l'angle de dérive. L'application de ces résultats sur des données réelles (en post-traitement) n'a pu être effectuée que dans le cas de l'estimation de la position. L'estimation ensembliste de la dérive a, quant à elle, donnée lieu à l'utilisation de données simulées.

5.3.2. Approche statistique : le filtrage de Kalman

Dans la théorie de l'estimation, le filtrage de Kalman se place au niveau des estimateurs à variance minimale. Il permet l'estimation d'un vecteur d'état "**x**" en statique ou en dynamique. Pour un système linéaire dont les bruits de mesure et d'observation sont blancs, de distributions gaussiennes et à moyennes centrées, la théorie montre que le filtre de Kalman est un estimateur optimal.

Dans bon nombre d'applications, les équations qui régissent le système, les mesures ou les observations sont non-linéaires. Dès lors, le filtre de Kalman ne peut être appliqué en tant que tel, et une linéarisation du processus est nécessaire. Celle-ci s'opère généralement autour de la dernière estimation effectuée, à l'aide de développements en série de Taylor. On parlera alors de **filtrage de Kalman étendu**[2]. Ce filtre est caractérisé par sa structure récursive et ses performances sont en relation avec la précision de l'estimation initiale.

Finalement, le filtre de Kalman est un très bon compris entre les performances d'estimation obtenues (même dans le cas d'une application non-linéaire) et les capacités de traitement nécessaires à sa mise en œuvre. C'est pourquoi, il demeure la solution priviligiée pour le positionnement.

Notion de faible et fort couplage

Les termes **"faiblement couplé"** et **"fortement couplé"** se retrouvent dans la littérature pour décrire les deux méthodes de fusion possibles par filtrage de Kalman. Dans une structure à "**fort couplage**", l'estimateur détermine directement, en fonction des informations de l'ensemble des capteurs, l'état du système observé (cf. figure 5.7). Un estimateur à faible couplage détermine uniquement, en fonction d'un capteur de référence[3], les corrections à apporter à l'état calculé par d'autres sources d'informations moins fiables (cf. figure 5.6). Très souvent, c'est cette dernière solution qui est retenue car elle demande moins de puissance de calcul, l'étape de correction n'étant effectuée que lorsque des observations sont disponibles (cf. §5.4.4).

Wendel *et al.* ont mené une étude comparative entre ces deux architectures dans le cadre d'une estimation d'accélérations, de vitesses et de position en trois dimensions [WEN00]. Les algorithmes de filtrage se basent sur les architectures illustrées sur les figures 5.6 et 5.7.

Les résultats obtenus montrent que **l'architecture à fort couplage présente une meilleure estimation des paramètres** et est plus robuste en cas de détérioration de la précision des données GPS (zone d'ombre satellitaire). Cependant, si les matrices de covariances réelles des bruits de mesure s'éloignent de celles utilisées dans les équations de Kalman, les résultats obtenus avec un fort couplage se dégradent considérablement, alors que l'autre architecture est moins sensible à ces variations.

Il est à noter que ces algorithmes ont été développés pour l'aéronautique, nécessitant une localisation en 3D extrêmement précise, et sont basés sur des techniques de perception coûteuses (gyroscope à fibre optique...). Néanmoins, une application de ces deux méthodologies a été effectuée sur la base de fichiers de mesures issus du véhicule d'essai du MIAM et dans le cadre d'une collaboration avec les auteurs de ces travaux. L'intérêt résidait

[2] L'acronyme EKF (de "*Extended Kalman Filtering*") est souvent employé dans la littérature.
[3] généralement le plus fiable.

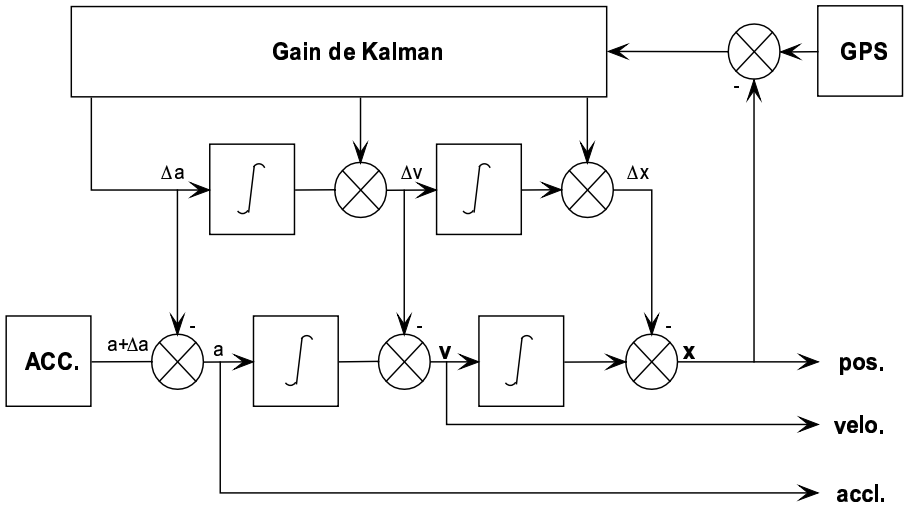


FIG. 5.6. : Filtrage à faible couplage selon [WEN00]

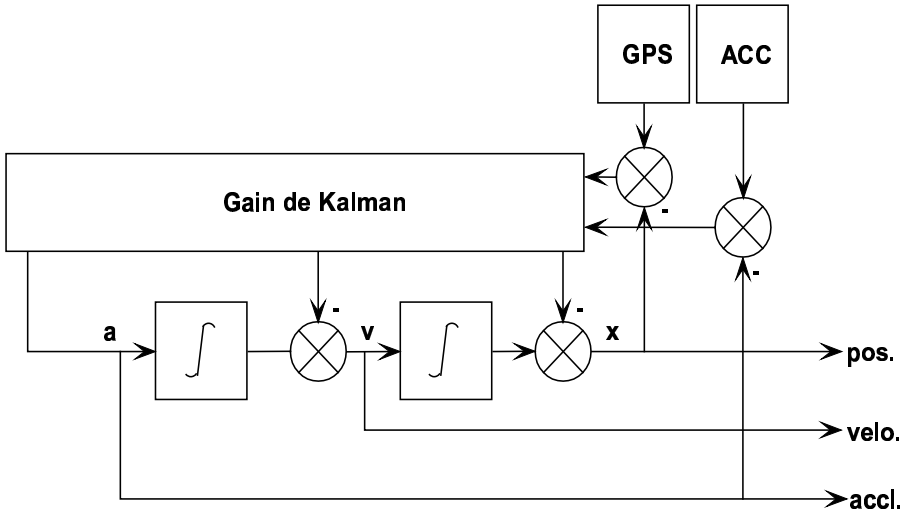


FIG. 5.7. : Filtrage à fort couplage selon [WEN00]

dans l'évaluation des performances des filtres à faible et fort couplage basés sur des capteurs standards (faible coût). Les techniques fondées sur une double intégration des données des accéléromètres sont très sensibles aux bruits de mesure sur ces signaux. Par ailleurs, si dans l'aviation le tangage et le roulis peuvent atteindre des valeurs importantes donc aisément mesurables, la conduite sur route est caractérisée par des variations faibles de ces grandeurs. Ces variations sont difficilement détectables par des capteurs faible coût. Par conséquent, l'emploi de ce type de signaux génère une divergence importante de l'estimateur.

5.3.3. Approche statistique : alternative au filtre de Kalman

Nous l'avons déjà mentionné, le filtrage de Kalman requiert des hypothèses de linéarité du modèle d'évolution et des observations ainsi qu'une connaissance *a priori* des distributions statistiques des bruits. Ces hypothèses ne sont clairement pas satisfaites dans le cas du positionnement d'un véhicule et c'est pourquoi le filtrage de Kalman étendu est souvent employé. Ce dernier nécessite des calculs supplémentaires de matrices jacobiennes (cf. §5.4.5), afin de linéariser le système autour d'un point de fonctionnement. Ces calculs peuvent s'avérer délicats pour une implémentation temps-réel et introduisent des erreurs dans les estimations.

Dans [JUL95], Julier *et al.* propose un estimateur récursif linéaire particulièrement adapté aux systèmes non-linéaires. Celui-ci est en fait une généralisation du filtre de Kalman, basée sur une **meilleure approximation de la covariance de l'estimateur** [JUL97b].

Appliqué au positionnement, l'auteur mentionne que le gain en précision du DAF ("***Distribution Approximation Filter***") n'est pas notable mais que le principal attrait réside dans le fait que des résultats équivalents à un EKF sont obtenus sans calcul des matrices jacobiennes.

5.3.4. Approche probabiliste : le filtrage particulaire

Le filtrage particulaire est une **méthode d'estimation optimale de modèle non-linéaire** d'un processus observé au travers de capteurs. Elle repose sur l'exploration de l'espace d'état du problème par des "particules" dont la dynamique évolue de manière non-déterministe. L'ensemble des particules est distribué selon la probabilité conditionnelle du processus à estimer. Cette théorie s'appuie sur les probabilités conditionnelles telles que définies par la règle de Bayes.

Ne s'appuyant pas sur une résolution explicite des équations du problème considéré, cette méthode est particulièrement adaptée aux systèmes non-linéaires ou ne satisfaisant pas aux hypothèses sur lesquelles se basent les méthodes statistiques.

Dans le formalisme de Kalman, l'hypothèse de fonctions de densité de probabilité (FDP) gaussiennes est nécessaire afin de pouvoir employer ce principe d'estimation. L'idée du filtrage particulaire réside dans la représentation des FDP (non-obligatoirement gaussiennes) par des échantillons (des "particules") aléatoires.

Ce principe consiste à approcher la FDP représentant la configuration du mobile x=(x, y, ψ) à partir d'un jeu de N échantillons ou de particules (s_l, π_l), l=1...N où π_l est le poids de chaque particule. Les trajectoires des particules sont représentées par des courbes et leur poids respectif par la hauteur des flèches (cf. figure 5.8).

L'algorithme de filtrage particulaire[4] s'appuie sur trois phases :

- **Phase de ré-échantillonnage** : à partir de la FDP p(x(i-1)|Z(i-1)), où Z(i-1) désigne l'ensemble des mesures z(k), k=0...i-1 réalisées jusqu'à l'instant t_{i-1}, on tire aléatoirement un jeu de N particules qu'on affecte du poids π_l=1/N,
- **Phase de prédiction** : les nouvelles coordonnées x_l(i|i-1) de chaque échantillon sont prédites à partir des coordonnées précédentes et de l'entrée de contrôle **u(i)**. Toutes les particules gardent les même poids,
- **Phase de recalage** : Les mesures des capteurs extéroceptifs **z(j)** sont prises en compte en pondérant chaque échantillon par p(z(j)|x_l(j|j-1)). On en déduit une nouvelle FDP approchée p(x(j)|Z(j)).

Par opposition au filtre de Kalman qui est une méthode de localisation "locale" (se basant sur la connaissance *a priori* d'une configuration initiale), les filtres particulaires permettent la localisation "globale" en repérant le véhicule dans son environnement [DEL99, FOX99, JEN00]. Aucune connaissance de la position de départ n'est nécessaire puisqu'il suffit de considérer à l'initialisation que la densité de probabilité p(x(0)) est uniformément

[4] portant le nom de "Condensation" [JEN00] ou "Monte Carlo Localization" [DEL99, FOX99].

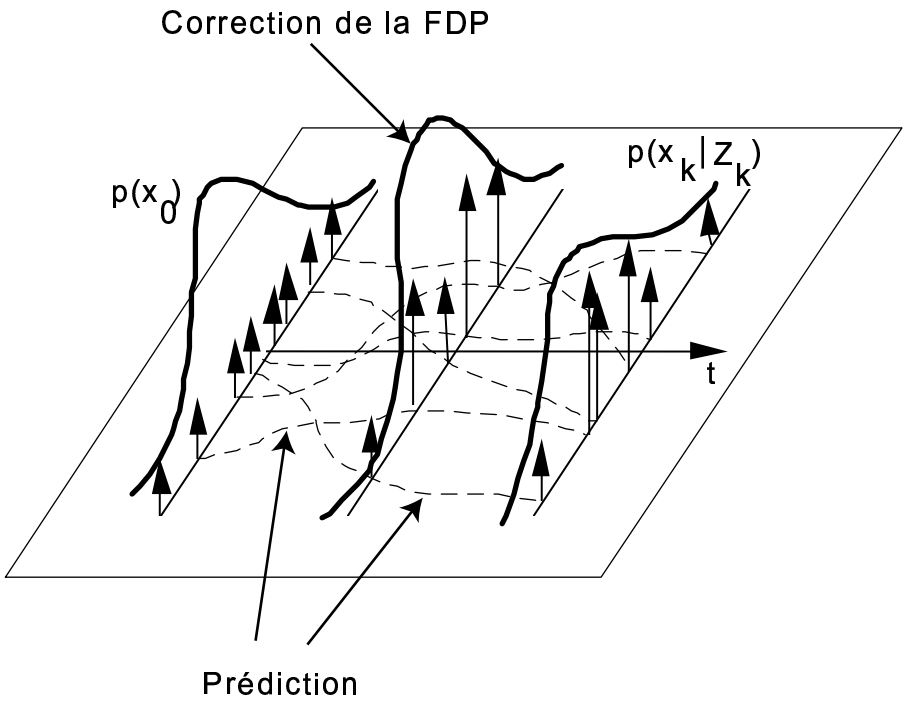


FIG. 5.8. : Principe du filtrage particulaire

répartie sur l'ensemble de l'environnement du mobile. Par ailleurs, les filtres particulaires ont l'avantage de pouvoir représenter les distributions de probabilité ambigües. Celles-ci apparaissent lorsque le nombre d'observations n'est pas suffisant pour déterminer avec certitude les coordonnées du mobile : on a, dans ce cas, plusieurs localisations possibles.

Néanmoins, selon [BOU00], "*si cette approche est très prometteuse pour la navigation en intérieur, ses atouts semblent moins évidents lorsqu'elle est appliquée en extérieur...*".

De plus, le filtrage particulaire ne permet pas, à l'heure actuelle, des applications temps-réel dans la mesure où les calculs à effectuer à chaque échantillon sont conséquents.

Une étude détaillée de cette catégorie d'estimateurs peut être trouvée dans [OUD00].

5.4. Fusion de données pour le positionnement d'un véhicule routier

5.4.1. Principe de positionnement

Le positionnement d'un véhicule fait généralement appel à deux types de capteurs : ***extéroceptifs*** et ***proprioceptifs***. On s'attache à mesurer une grandeur de l'environnement du véhicule dans le premier cas, et directement liée au véhicule dans le deuxième. De manière analogue, les procédés d'estimation de la position peuvent être regroupés en *"positionnement absolu*" ou *"relatif"*, selon qu'ils suivent des informations extéroceptives ou proprioceptives.

Le positionnement absolu du véhicule résulte des informations directement prélevées sur l'environnement par rapport à un repère fixe de position connue. A contrario, **le positionnement relatif consiste à calculer, dans un repère lié au véhicule, le mouvement de celui-ci par rapport à son environnement, à partir d'une configuration initiale connue.** On procède par intégration de grandeurs dynamiques relevées sur le véhicule telles la vitesse linéaire ou la vitesse de rotation...

Malheureusement, aucune de ces deux techniques n'est suffisamment fiable pour estimer en tout point et à tout moment la configuration du véhicule. Dès lors, le recours à la fusion multisensorielle est inévitable pour garantir un positionnement précis à chaque instant, et quelque soit le milieu d'évolution. JULIER *et al.* mentionne

trois raisons à l'utilisation de plusieurs capteurs pour l'élaboration d'un dispositif de positionnement [JUL97a] :

- la redondance d'information garantit la tolérance aux pannes : si un capteur pose problème, le positionnement s'effectue avec ceux encore disponibles,
- les capteurs mesurent chacun une grandeur différente,
- les mesures sont effectuées avec les caractéristiques inhérentes à chaque capteur (précision, bruits, dérives...).

Ainsi, les avantages d'une méthode de mesure palient aux inconvénients de l'autre. Il convient cependant d'être prudent dans le choix des capteurs afin que l'objectif de complémentarité et d'accroissement de la précision soit atteint. Une approche originale est d'étudier les capteurs d'un point de vue fréquentiel par rapport aux grandeurs à estimer. L'association de capteurs la plus efficace sera celle qui couvrira le mieux la bande de fréquences des estimations recherchées [COO96]. On définit alors trois grandes classes de capteurs [SCH97a] :

1. **Type 1** : capteur "absolu" fournissant une mesure directe, dans une plage fréquentielle restreinte, de la variable d'état à laquelle on s'intéresse. Les capteurs de type 1 sont caractérisés par un bruit de mesure blanc. Pour reprendre l'exemple de l'observation de la position d'un véhicule, le GPS différentiel est un capteur de ce type,
2. **Type 2** : Dans une plage fréquentielle restreinte, cette classe de capteur fournit une mesure dont le bruit est corrélé dans le temps. Un GPS soumis à la dégradation volontaire est un capteur de cette catégorie,
3. **Type 3** : ce type de capteur délivre une information de haute fréquence qui complémente celles des capteurs de type 1 et 2. Il mesure généralement les vitesses ou accélérations et est soumis à des bruits de mesure caractérisés par une dérive importante (classiquement un mouvement Brownien).

L'intérêt de cette technique réside dans la possibilité de déterminer les types de capteurs complémentaires (i. e. qui fusionnés, ont un impact positif sur la bande passante du système). Mais l'auteur précise que les performances propres à chaque capteur ainsi défini ne satisfont pas obligatoirement aux exigences et qu'il convient de s'en assurer. Enfin, l'approche fréquentielle apporte une explication au fait que l'automaticien choisisse des capteurs absolus (type 1) et relatifs (type 3) pour concevoir un module de positionnement.

5.4.2. Sélection des informations pour le positionnement

Les informations utilisées pour la localisation du véhicule dans le projet NAICC sont les vitesses longitudinale V_L et transversale V_T, la vitesse de lacet $\dot{\psi}$ et finalement les observations fournies par un système GPS. Dans le dispositif décrit dans cette thèse, les vitesses linéaires seront fournies par un capteur de vitesse optique (cf. chapitre 6). Ce capteur (appelé par abus de langage correvit) n'est employé que lors des phases d'expérimentation et doit être remplacé (du fait de sont coût élevé) par un estimateur fondé sur les mesures de vitesses des roues[5]. La vitesse de lacet du véhicule est mesurée par un gyromètre piézo-électrique. Enfin, le GPS sera utilisé dans son mode différentiel. Plusieurs raisons ont guidé notre choix vers cette solution :

1. les progrès technologiques actuels, couplés à l'évolution fulgurante du système GPS depuis son invention permettent raisonnablement de penser que la précision de ce système de positionnement ne peut qu'accroître. La table 5.1 extraite du rapport final du projet *NextMAP* [PAN02] présente l'évolution pressentie pour les 10 prochaines années en matière de performance des systèmes embarqués,
2. devant le succès rencontré par le GPS dans certains pays (Etats-Unis, Japon), des antennes de référence ont été installées pour l'utilisation des GPS en mode différentiel (cf. chapitre 6), on peut donc penser à un développement analogue en Europe,
3. si le GPS ne devait pas permettre d'obtenir un positionnement plus précis (pour des raisons économiques, technologiques...) dans les prochaines années, d'autres approches seraient très certainement privilégiées ou verraient le jour pour y remédier[6].

[5] Ces informations sont disponibles sur l'ensemble des véhicules équipés d'un dispositif ABS.
[6] Un appareil aussi populaire que le téléphone portable permet d'ores et déjà de localiser un utilisateur...

Évolution des besoins	2001	2004	2006	2008	2010	2012
Disponibilité des cartographies						
Pays de 1ère disponibilité	EU	EU	EU	EU	EU	EU
Année de disponibilité	Actuellement	2004	2006	2008	2010	2012
Précision géométrique requise						
Position du véhicule (GPS, DR...)	± 15m	± 3m	± 3m	± 1-2m	± 1-2m	± 1m
Précision absolue	5-25m	4m	4m	2-4m	2-4m	2m
Précision relative	5-15m	1-2m	1-2m	0.5-1m	0.5-1m	0.5m

TAB. 5.1.: Evolution des performances des systèmes embarqués selon [PAN02]

5.4.3. Choix de l'estimateur

Notre choix s'est porté sur une hybridation multisensorielle par filtrage de Kalman. A cela, on dénombre plusieurs raisons :

1. cette technique a été implémentée avec succès dans de nombreuses applications temps-réel de fusion multi-capteurs telles la navigation[7] en intérieur, en extérieur de robots mais également dans le cadre de véhicules routiers,
2. sa simplicité de mise en œuvre, et la possibilité de définir les performances de la fusion grâce au calcul de la matrice de covariance,
3. la suppression de la dégradation volontaire (*"Selective Availability"*) du signal GPS. La SA introduisait une erreur identique sur l'ensemble des satellites. Celle-ci se traduisait par des erreurs de mesures du GPS corrélées dans le temps [NEB97]. On peut donc poser l'hypothèse que la suppression de cette dégradation s'est accompagnée de la décorrélation des bruits de mesure. Si nous n'avons en pratique pas vérifié cette hypothèse avec notre dispositif, nous signalons néanmoins que, compte-tenu de la précision centimétrique du GPS utilisé, les biais seront faibles (de l'ordre du centimètre).

On l'a vu au début de ce chapitre, trois structures de fusion de données sont envisageables (centralisée, décentralisée et hybride). Dans notre cas, nous retenons une architecture hybride : l'estimation de la configuration du véhicule se basera sur l'utilisation de données brutes (issues du DGPS et du capteur de vitesses) mais également de données pré-estimées. Nous verrons effectivement dans le paragraphe 5.5.1 que la vitesse de lacet subit une première estimation dont l'objectif est de compenser la dérive importante du gyromètre.

5.4.4. Théorie du filtrage de Kalman

Cette section et la suivante fournissent de manière synthétique la théorie relative au filtre de Kalman. L'implémentation de ce type d'estimateurs sur des ordinateurs nécessite la discrétisation du procédé étudié. La formulation temporelle continue sera donc volontairement passée sous silence[8] au profit de la théorie de filtrage de Kalman discret, des processus linéaires et non-linéaires. Seules les équations relatives au filtre de Kalman et filtre de Kalman étendu sont présentées. La littérature abondante à ce sujet permettra au lecteur de trouver de plus amples informations sur cette catégorie d'estimateurs [BRO92, MAY79].

Un système linéaire, à évènements discrets, peut être décrit par une relation d'évolution de la forme :

$$\mathrm{x}(k) = F(k-1)\mathrm{x}(k-1) + B(k-1)\mathrm{u}(k-1) + \mathrm{w}(k-1) \tag{5.3}$$

où $\mathbf{x}(k)$ représente le vecteur d'état à l'instant k, $F(k\text{-}1)$ est la matrice de transition (également appelée modèle d'évolution du système) entre les instants (k-1) et k. $\mathbf{u}(k\text{-}1)$ désigne la commande appliquée au système par l'intermédiaire de $B(k\text{-}1)$ et $\mathbf{w}(k\text{-}1)$ correspond au bruit injecté dans le système du fait d'imprécisions de modélisation (sur la matrice de transition et sur les entrées de commande).

[7] Ce terme désigne ici le déplacement d'un robot et n'est pas à considérer suivant la définition donnée dans le chapitre 1.
[8] La discrétisation du processus d'estimation de la vitesse et de l'angle de lacet dont il sera question par la suite est présentée dans l'annexe A.

Le filtre de Kalman estime l'état "**x**" du système, étant donné son modèle d'évolution et une observation (i. e. mesure) de cet état, définie par $\mathbf{z}(k)$:

$$\mathrm{z}(k) = H(k)\mathrm{x}(k) + \mathrm{v}(k) \tag{5.4}$$

où $H(k)$ est le modèle d'observation entre le vecteur d'état et l'observation $\mathbf{z}(k)$, et $\mathbf{v}(k)$ désigne le bruit d'observation. Les bruits sur le processus **w** et sur l'observation **v** sont considérés blancs, gaussiens, centrés et décorrélés :

$$E\left[\mathrm{w}(i)\mathrm{w}(j)^T\right] = \begin{cases} Q(k), & \text{si } i = j = k \\ 0, & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

$$E\left[\mathrm{v}(i)\mathrm{v}(j)^T\right] = \begin{cases} R(k), & \text{si } i = j = k \\ 0, & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

$$E\left[\mathrm{w}(i)\mathrm{v}(j)\right] = 0 \ \forall i,\ j$$

Le filtre de Kalman est un estimateur statistique, récursif, qui fournit à un instant k une **estimation** optimale des états $\hat{\mathrm{x}}(k \mid k)$ en fonction de l'ensemble des observations disponibles. A contrario, la **prédiction** correspond au calcul des états $\hat{\mathrm{x}}(k \mid k-1)$, en prenant en compte les commandes et états disponibles à l'instant (k-1). Il est optimal en ce sens qu'il fournit une estimation minimisant un critère d'erreur quadratique.

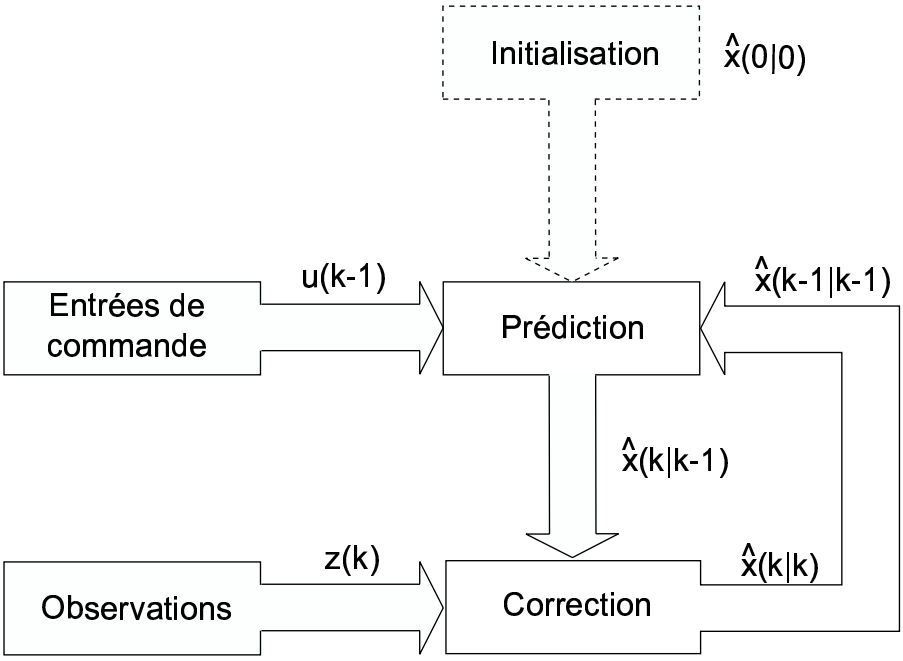


FIG. 5.9. : Filtrage de Kalman discret

L'algorithme est articulé autour de 2 étapes successives décrites sur la figure 5.9 :

♢ **Prédiction** des états et de l'incertitude sur la prédiction (représentée par le calcul de la covariance $P(k \mid k-1)$) :

$$\hat{\mathrm{x}}(k \mid k-1) = F(k-1)\hat{\mathrm{x}}(k-1 \mid k-1) + B(k-1)\mathrm{u}(k-1) \tag{5.5}$$

$$P(k \mid k-1) = F(k-1)P(k-1 \mid k-1)F^T(k-1) + Q(k-1) \tag{5.6}$$

Ces équations sont évaluées à chaque itération.

♢ **Estimation** ou **correction** : lorsqu'une nouvelle observation est disponible, on calcule une estimation des états et de la matrice de covariance à partir de celles prédites dans l'étape précédente :

$$\begin{aligned} \widehat{\mathrm{x}}(k \mid k) &= \widehat{\mathrm{x}}(k \mid k-1) + K(k)[\mathrm{z}(k) - H(k)\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k-1)] && (5.7) \\ P(k \mid k) &= P(k \mid k-1)[I - K(k)H(k)] && (5.8) \end{aligned}$$

où $K(k)$ représente le gain de Kalman minimisant l'erreur quadratique, et défini par la relation :

$$K(k) = P(k \mid k-1)H^T(k)S^{-1}(k) \tag{5.9}$$

et $S(k)$ désigne la covariance de la séquence d'innovation du filtre :

$$S(k) = H(k)P(k \mid k-1)H^T(k) + R(k) \tag{5.10}$$

Dans la relation (5.7), la grandeur $[\mathrm{z}(k) - H(k)\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k-1)]$ représente l'innovation et est notée $\mathbf{v}(k)$. L'innovation est la différence entre l'observation réelle et celle prédite lors de la première étape. L'innovation est un moyen de vérification de la convergence du filtre. Elle doit être une séquence blanche et centrée. La convergence peut aussi être controlée en vérifiant que les matrices $P(k)$ et $K(k)$ tendent vers zéro après quelques itérations.

La nature récursive dûe à la répétition du cycle "Prédiction-Estimation" permet une implémentation du filtre en temps-réel.

Remarques

L'implémentation d'un filtre de Kalman nécessite une connaissance *a priori* des bruits de mesureet de modélisation respectivement $\mathbf{v}(k)$ et $\mathbf{w}(k)$ (et plus particulièrement de l'espérance mathématique de second ordre) ainsi que des conditions initiales du système à estimer. Il convient effectivement d'initialiser à la fois le vecteur d'états "$\mathbf{x}$" et la matrice de covariance du filtre P. Les résultats de l'estimation et la rapidité de convergence du filtre sont fortement dépendants de l'initialisation.

Lors de la phase de prédiction, le filtre se base sur la matrice de transition F, qui représente le modèle d'évolution du processus. Ce modèle permet de fournir une nouvelle prédiction de l'état du système, compte-tenu de la dernière estimation (cf. figure 5.9). Il apparaît donc clairement que la qualité de modélisation est primordiale dans la convergence du filtre. Néanmoins, plus le nombre de variables du vecteur d'état sera élevé, plus la convergence sera lente. Il faut également un nombre suffisant de variables pour assurer une bonne modélisation. La mise en œuvre d'un filtre de Kalman nécessite par conséquent une part d'expertise non négligeable.

Finalement, il convient de remarquer qu'un des inconvénients de cette solution est l'obligation d'inverser des matrices, mais ce point peut être facilement surmonté avec les techniques numériques actuelles.

5.4.5. Processus non-linéaire : filtre de Kalman étendu

Le filtrage de Kalman introduit dans le paragraphe précédent s'applique à des systèmes régis par des équations d'état ou d'observation linéaires. En pratique, peu de systèmes possèdent ces propriétés, et l'une ou l'autre des équations est souvent non-linéaire. Dans ce cas, on utilise le **filtre de Kalman étendu** (**EKF**), qui est une version sous-optimale au sens de la minimisation de l'erreur quadratique. Son principe consiste à **linéariser le processus et les observations autour de l'estimation courante de l'état $\widehat{\mathbf{x}}$**. Classiquement, cette linéarisation s'opère à l'ordre 1.

Supposons un processus discret, défini par les deux relations de non-linéarité ci-après :

$$\begin{aligned} \mathrm{x}(k) &= F(\mathrm{x}(k-1),\ \mathrm{u}(k-1),\ k-1) + \mathrm{w}(k-1) && (5.11) \\ \mathrm{z}(k) &= H(\mathrm{x}(k)) + \mathrm{v}(k) && (5.12) \end{aligned}$$

où $F(\cdot, \cdot,\ k-1)$ désigne une fonction de transition non-linéaire entre l'état courant (k), l'état précédent et la commande $\mathbf{u}$ à l'instant (k-1). En respectant le formalisme présenté dans la section précédente, il vient :

♢ **Prédiction :**

$$\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k-1) = F(\widehat{\mathrm{x}}(k-1 \mid k-1),\ \mathrm{u}(k-1)) \tag{5.13}$$
$$P(k \mid k-1) = \nabla F_{\mathrm{x}}(k-1) P(k-1 \mid k-1) \nabla F_{\mathrm{x}}^{T}(k-1) + Q(k-1) \tag{5.14}$$

Le terme $\nabla F_{\mathrm{x}}(k-1)$ représente le Jacobien de la matrice de transition en fonction du vecteur d'état "**x**". Lorsqu'une observation est disponible, la phase de correction se traduit par :

♢ **Correction :**

$$\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k) = \widehat{\mathrm{x}}(k \mid k-1) + K(k)[\mathrm{z}(k) - H(\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k-1))] \tag{5.15}$$
$$P(k \mid k) = [I - K(k)\nabla H_{\mathrm{x}}(k)] P(k \mid k-1) [I - K(k)\nabla H_{\mathrm{x}}(k)]^{T} + K(k) R(k) K(k) \tag{5.16}$$

où $K(k)$ représente le gain de Kalman minimisant l'erreur quadratique, et définit par la relation :

$$K(k) = P(k \mid k-1) \nabla H_{\mathrm{x}}^{T}(k) S^{-1}(k) \tag{5.17}$$

et $S(k)$ désigne la covariance de la séquence d'innovation du filtre :

$$S(k) = \nabla H_{\mathrm{x}}(k) P(k \mid k-1) \nabla H_{\mathrm{x}}^{T}(k) + R(k) \tag{5.18}$$

Le terme $\nabla H_{\mathrm{x}}(k)$ est le jacobien du modèle d'observation par rapport à l'état estimé $\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k)$.

Un filtre de ce type n'est qu'une approximation d'un filtre optimal. Les résultats sont directement fonction de la qualité de la linéarisation d'ordre 1.

5.4.6. Modèle d'évolution du véhicule

Dans la section précédente, nous avons insisté sur la nécessité d'employer un modèle d'évolution F qui soit fidèle au processus observé. Néanmoins, à vouloir être trop fidèle, le modèle peut s'avérer délicat à mettre en œuvre et surtout lourd en temps de calcul. Ce modèle est utilisé par le filtre durant la prédiction lorsqu'aucune observation n'est disponible. Il est primordial pour évaluer comment des grandeurs non-observables affectent le déplacement du véhicule, ou pour utiliser à bon escient les données issues des capteurs.

Pour l'estimation du positionnement d'un véhicule, les modèles classiquement employés sont soient des modèles d'évolution **cinématiques**, soient **dynamiques**. De nombreux modèles ont ainsi été employés dans des estimateurs de Kalman, leur complexité étant fonction du domaine d'application. En robotique, où les vitesses sont faibles, un modèle cinématique sans prise en compte de la dérive est très souvent utilisé [BON96]. D'un autre côté, la localisation d'un engin de chantier (par exemple un compacteur), ne peut se passer de l'estimation de la dérive [SCH97b], caractéristique du déplacement de ces engins.

Le choix du modèle d'évolution approprié n'est pas une chose aisée : chaque modèle possède son domaine de validité propre. Afin d'augmenter le domaine de validité du modèle utilisé tout en limitant sa complexité, certains auteurs proposent une solution basée sur une approche multi-modèle. Le modèle adéquat est alors choisi à partir d'une base de règles [JUL97a].

Pour le positionnement de véhicules routiers, le modèle le plus employé demeure sans conteste le modèle à deux degré de liberté : le modèle "lacet-dérive". Ce dernier est, en effet, un très bon compromis entre performances et temps de calcul et est valable dans des conditions de conduite "normales". De fait, devant le nombre d'applications utilisant des modèles cinématiques et surtout compte tenu des performances obtenues, le choix de cette solution semble naturel.

Considérons la situation présentée sur la figure 5.10, illustrant la cinématique d'une manœuvre de prise de virage. On suppose qu'un véhicule peut être représenté par un modèle où les roues d'un même train sont ramenées sur l'axe longitudinal du véhicule. Le chassis est considéré comme indéformable et les mouvements des suspensions ne sont pas considérés. L'orientation du véhicule par rapport à un repère galliléen fixe est défini par l'angle ψ. La prise en compte de la dérive se traduit par un déplacement du véhicule dans une direction différente de celle définie par l'orientation des roues. Ainsi, le vecteur vitesse au niveau de la roue arrière (virtuelle) $\overrightarrow{V_B}$

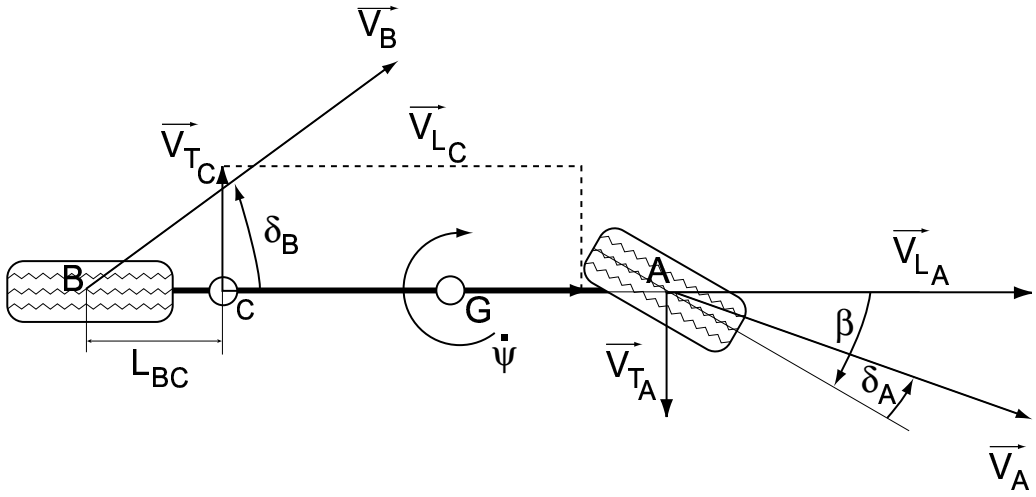


FIG. 5.10. : Modèle simplifié de prise de virage

n'est pas dirigé le long de l'axe longitudinal du véhicule. Le déplacement dans le plan du point B, caractéristique de la roue arrière est défini par :

$$\begin{aligned} \dot{x}_B(t) &= V_B(t)\cos(\psi(t)+\delta_B(t)) \\ \dot{y}_B(t) &= V_B(t)\sin(\psi(t)+\delta_B(t)) \end{aligned} \tag{5.19}$$

Compte-tenu des données relevées sur le véhicule, nous préférons utiliser les relations (5.20) faisant directement apparaître les vitesses longitudinale V_L et transversale V_T du capteur de vitesse ainsi que l'intégrale de l'angle de lacet ψ ($\dot{\psi}$ étant relevé à l'aide d'un gyromètre).

$$\begin{aligned} \dot{x}_B(t) &= V_{L_B}(t)\cos\psi(t) - V_{T_B}(t)\sin\psi(t) \\ \dot{y}_B(t) &= V_{L_B}(t)\sin\psi(t) + V_{T_B}(t)\cos\psi(t) \end{aligned} \tag{5.20}$$

Le correvit est situé dans le coffre du véhicule à une distance L_{BC} de l'essieu arrière (cf. figure 5.10), i. e. du point B. Par conséquent, selon les relations de la cinématique :

$$\overrightarrow{V_B} = \overrightarrow{V_C} + \overrightarrow{L_{BC}} \wedge \overrightarrow{\Omega} \tag{5.21}$$

où $\overrightarrow{\Omega}$ désigne la vitesse de rotation du véhicule par rapport au repère fixe. En particulier, on obtient :

$$\begin{aligned} V_{L_B} &= V_{L_C} \\ V_{T_B} &= V_{T_C} + L_{BC}\dot{\psi} \end{aligned} \tag{5.22}$$

Le modèle d'évolution implémenté dans l'hybridation multisensorielle est issu des équations (5.20). S'il ne fait pas apparaître explicitement les termes relatifs à la dérive, ceux-ci y sont implicitement intégrés de par la prise en compte de la vitesse latérale.

5.5. Architecture hybride développée

Cette section décrit l'algorithme de positionnement temps-réel utilisé dans le module de localisation. Il fusionne les données issues des capteurs montés sur le véhicule (capteur de vitesse et gyromètre) avec celles prélevées sur l'environnement (par l'intermédiaire du système DGPS).

Dans cette première solution, il n'est pas tenu compte de l'influence des mouvements de caisse (roulis et tangage) sur la mesure du gyromètre. Lors d'une phase de freinage par exemple, ce dernier ne mesure plus exactement la vitesse de rotation du véhicule autour de l'axe vertical. Des tests de compensation de ces mouvements (par utilisation des signaux issus des gyromètres destinés à mesurer le roulis et le tangage) n'ont pas produit de résultat significatif. Le rapport signal sur bruit sur ce type de mesures étant trop faible.

5.5.1. Architecture d'estimation et de fusion

L'architecture hybride que nous proposons se constitue de deux étapes :

- ***estimation par filtrage de Kalman de l'angle de lacet*** $\widehat{\psi}$ ***et de la vitesse de lacet*** $\widehat{\dot{\psi}}$ du véhicule : un premier filtre de Kalman utilise la mesure de la vitesse de lacet $\dot{\psi}$, et les propriétés statistiques de celle-ci afin d'une part, d'estimer l'évolution de l'angle de lacet du véhicule $\widehat{\psi}$. D'autre part, il corrige le biais ainsi que la dérive sur la mesure de $\dot{\psi}$. La sortie de ce filtre sera notamment composée des estimations de l'angle $\widehat{\psi}$ et de la vitesse de rotation $\widehat{\dot{\psi}}$ du véhicule,
- ***fusion des données absolues et relatives pour le positionnement*** du véhicule : à partir des informations d'observation fournies par le système DGPS, un EKF estime la position du véhicule ainsi que son orientation absolue à partir de l'estimation de la vitesse de lacet $\widehat{\dot{\psi}}$ effectuée précedemment.

La figure 5.11 illustre la structure du module d'estimation de la position du véhicule. Le gyromètre ENV-05D de Murata mesure la vitesse de lacet $\dot{\psi}$ du véhicule autour de l'axe vertical, et comme l'ensemble des capteurs inertiels, il est caractérisé par une dérive basse fréquence importante. Néanmoins il dispose de facultés de mesure en haute fréquence très intéressantes, puisqu'il détecte des vitesses de rotation allant jusqu'à 90 °/s. Le premier filtre de Kalman a pour but de minimiser ce phénomène de dérive en se basant sur la propriété de blancheur du bruit de mesure. Cet estimateur est exécuté à chaque fois qu'une information provenant du gyromètre est disponible, c'est-à-dire à une cadence de 50 Hz. Il est présenté dans le paragraphe 5.5.2.

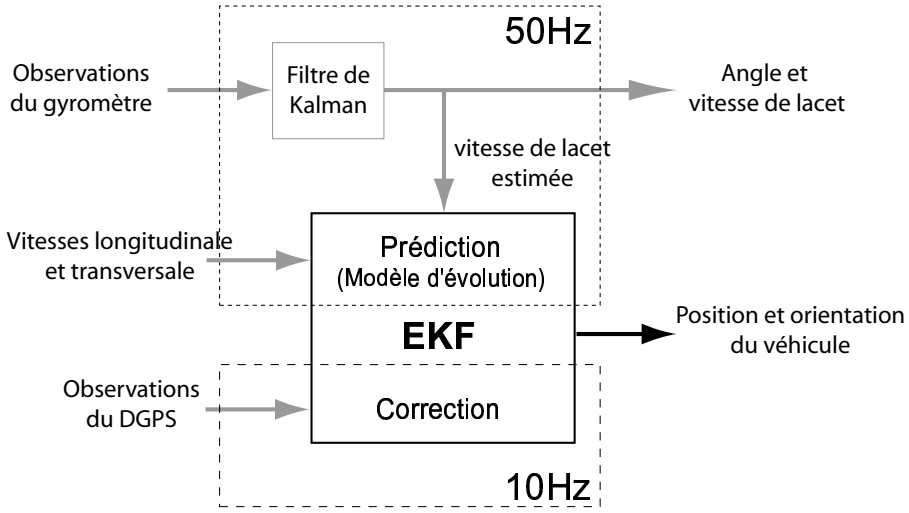


Fig. 5.11. : Architecture du module de positionnement

L'EKF emploie des données d'un capteur de Type 1 (le DGPS) représentant directement une partie des variables d'états que l'on cherche à estimer (x et y), et celles d'un capteur de type 3 (le capteur de vitesse fournissant une information fondamentale sur la dynamique du système). Le principe de cet estimateur est illustré dans le paragraphe 5.5.3.

Les fréquences d'acquisition des mesures extéroceptives (10 Hz) et proprioceptives (50 Hz) étant différentes, la phase de prédiction sera répétée 4 fois entre deux observations délivrées par le DGPS. En considérant un véhicule évoluant à une vitesse de 90 km/h, une estimation à 50 Hz et une correction à 10 Hz correspondent respectivement à la définition d'une position tous les 50 cm et un recalage tous les 2.5 m. Si dans le cadre de l'assistance longitudinale, une telle résolution peut sembler inutile, elle se justifie pleinement dans le cadre de

l'assistance latérale. Dans ce cas, un positionnement uniquement basé sur un système DGPS pourrait s'avérer insuffisant si la couverture satellitaire n'était pas optimale.

5.5.2. Estimation de l'angle et de la vitesse de lacet

Le principal attrait de cet estimateur est de se découpler des phénomènes inhérents au capteur faible coût employé (le gyromètre) pour la mesure de la vitesse de lacet. En effet, comme le mentionne [BOR96], l'imprécision de l'angle de lacet représente un facteur sensibilisant majeur dans l'estimation de la trajectoire. Ce capteur est soumis à une dérive temporelle importante principalement due à une variation de son facteur d'échelle en fonction des conditions d'expérimentation (essentiellement la température). La solution consiste à développer des modèles représentant l'erreur du capteur (i. e. son bruit de mesure) en vue de les intégrer dans des estimateurs de Kalman [BAR94, BAR95, MAR98].

Si des tests de blancheur du bruit de mesure des gyromètres MURATA ont montré que ces capteurs satisfont aux exigences du filtrage de Kalman [BON01b], il convient d'être prudent lors de l'implémentation de l'estimateur. On utilise souvent le gyromètre pour observer indirectement l'angle ψ, en intégrant le signal fourni par le capteur. Or, si ce signal de sortie est bruité par un bruit blanc, l'intégrale de celui-ci induiera l'intégrale de ce bruit blanc (ce type de signal porte le nom de "mouvement Brownien").

Si le gyromètre est utilisé comme observation de l'orientation du véhicule, les hypothèses de Kalman ne sont plus vérifiées, ce qui peut provoquer des problèmes de convergence de l'estimateur.

5.5.2.1. Filtre formeur

L'emploi d'un filtre formeur[9] peut apporter une solution au problème présenté ci-dessus. Un filtre formeur est un processus linéaire qui, à partir d'un bruit blanc, crée un bruit coloré en accord avec les erreurs du signal observé. Généralement, le filtre formeur est issu de l'étude de la *densité spectrale de puissance* du signal observé, et correspond à une représentation d'état d'un modèle de celle-ci. Des filtres formeurs courants sont présentés dans [MAR98, SCH97a]. Outre ces quelques exemples, des modèles également employés pour représenter des signaux à caractère stochastique sont les modèles AR ("*Auto Regressive*") ou encore ARMA ("*Auto Regressive Moving Average*") [WEN00]. Nous présentons ci-dessous la manière avec laquelle un filtre formeur est intégré dans la représentation d'état d'un système afin que ce dernier vérifie les hypothèses du filtrage de Kalman.

Considérons un système désigné par les relations :

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}}(t) &= F(t)\mathrm{x}(t) + G(t)\mathrm{w}(t) \\ \mathrm{z}(t) &= H(t)\mathrm{x}(t) + \mathrm{n}(t) + \mathrm{v}(t) \end{aligned} \tag{5.23}$$

où $\mathbf{n}(t)$ désigne un bruit coloré que l'on souhaite définir par un filtre formeur. $\mathbf{w}(t)$ et $\mathbf{v}(t)$ sont des bruits blancs. Tel quel, un filtre de Kalman ne pourrait être employé pour un système de ce type sans risquer des erreurs d'estimation.

Définissons un filtre formeur qui, à partir du bruit blanc $\mathrm{w}_{ff}(t)$ génère le bruit coloré $\mathbf{n}(\mathrm{t})$. La représentation d'état de ce filtre est :

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}}_{ff} &= F_{ff}(t)\mathrm{x}_{ff}(t) + G_{ff}(t)\mathrm{w}_{ff}(t) \\ \mathrm{n}(t) &= H_{ff}(t)\mathrm{x}_{ff}(t) \end{aligned} \tag{5.24}$$

L'indice *ff* est employé pour distinguer les grandeurs relatives au filtre formeur.

A présent, les bruits $\mathrm{w}(t)$, $\mathrm{w}_{ff}(t)$ caractérisant le processus défini par la représentation d'état (5.23) sont tous des bruits blancs. On peut donc réécrire la relation (5.23) tel que :

[9] dénommé "*shaping filter*" en anglais.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathrm{x}}(t) \\ \dot{\mathrm{x}}_{ff}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(t) & 0 \\ 0 & F_{ff}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{x}(t) \\ \mathrm{x}_{ff}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G(t) & 0 \\ 0 & G_{ff}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{w}(t) \\ \mathrm{w}_{ff}(t) \end{bmatrix} \tag{5.25}$$

$$\mathrm{z}(t) = \begin{bmatrix} H(t) & H_{ff}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{x}(t) \\ \mathrm{x}_{ff}(t) \end{bmatrix} + \mathrm{v}(t) \tag{5.26}$$

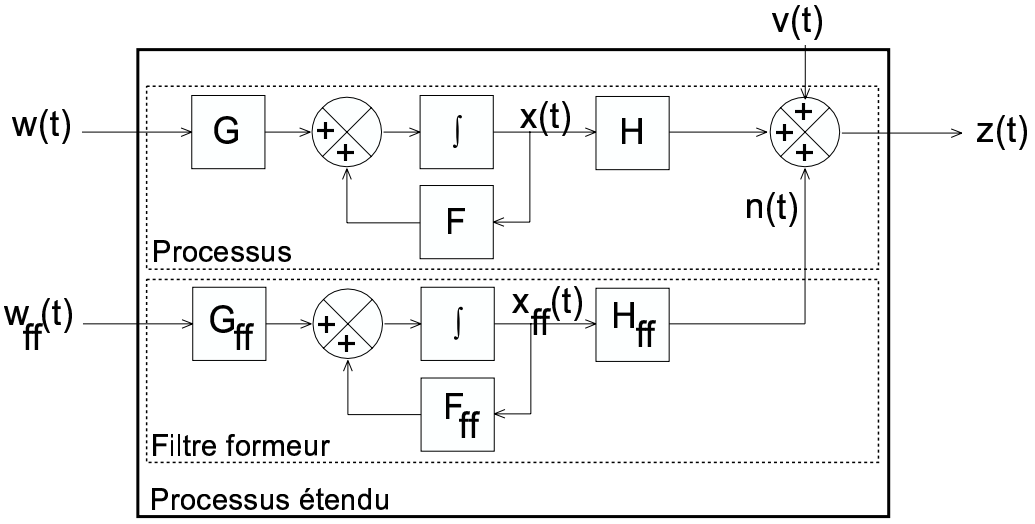


FIG. 5.12. : Modélisation d'un système avec un filtre formeur sur le bruit d'observation

Le processus "étendu" ainsi obtenu et illustré par la figure 5.12 satisfait à présent aux hypothèses de blancheur des bruits nécessaires pour l'estimation par filtrage de Kalman.

Appliquons à présent ce procédé à l'estimation de l'angle de lacet ψ du véhicule.

5.5.2.2. Modèle d'évolution

Nous proposons de représenter l'estimation de l'angle de lacet par un modèle appelé couramment "à accélération constante". Un modèle de ce type prend en compte, dans le vecteur d'état, une grandeur et ses dérivées du premier et deuxième ordre. Le choix de cette structure s'explique par la volonté d'utiliser un modèle représentant convenablement la dynamique du système observé (ici le gyromètre). Or, SCHEDING montre qu'un modèle "à vitesse constante" (ne considérant que la grandeur et sa dérivée première) est insuffisant dans ce cas de figure [SCH97a].

Un filtre formeur est intégré dans la représentation d'état "à accélération constante". Celui-ci a pour but de tenir compte du fait que la grandeur observée (l'angle de lacet) est caractérisée par un mouvement brownien représentant la dérive du capteur. Finalement, et en considérant l'implémentation discrète de l'ensemble (cf. annexe A2 donnant le principe retenu pour la discrétisation des matrices) le vecteur d'état discret est défini par :

$$\mathrm{x}_k = \left[\psi_k,\ \dot{\psi}_k,\ \ddot{\psi}_k,\ x_{ff_k}\right]^T \tag{5.27}$$

Le modèle linéaire discret décrivant ce système est de la forme $\mathrm{x}(k+1) = F(k)\mathrm{x}(k) + \mathrm{w}(k)$ et est détaillé par la relation (5.28) :

$$\begin{bmatrix} \psi_{k+1} \\ \dot{\psi}_{k+1} \\ \ddot{\psi}_{k+1} \\ x_{ff_{k+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_{ech} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_{ech} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_k \\ \dot{\psi}_k \\ \ddot{\psi}_k \\ x_{ff_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_{\ddot{\psi}_k} \\ w_{ff_k} \end{bmatrix} \tag{5.28}$$

A noter l'absence dans cette relation de l'entrée de contrôle **u**. En effet, il s'agit d'observer l'évolution du système sans excitation. Par ailleurs, les bruits sont tous considérés blancs, gaussiens, centrés, décorrélés et de variances respectives $\sigma^2_{\ddot{\psi}}$ et σ^2_{ff}.

5.5.2.3. Modèle d'observation de la vitesse de lacet

L'équation d'observation linéaire est de la forme $\mathrm{z}(k) = H(k)\mathrm{x}(k) + \mathrm{v}(k)$. Les observations du gyromètre z_{gyro} sont définies par une relation combinant à la fois $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ et le filtre formeur x_{ff} :

$$z_{gyro} = \left[\begin{array}{cccc} 0 & 1 & T_{ech} & 1 \end{array}\right] \mathrm{x}_k + v_{gyro} \tag{5.29}$$

dans laquelle v_{gyro} est considéré blanc et centré, de variance σ^2_{gyro}.

L'implémentation ainsi que les résultats de cet estimateur sont présentés dans le chapitre 6 consacré aux expérimentations.

5.5.3. L'EKF pour la fusion DGPS-mesures proprioceptives

Le rôle de cet EKF est de fournir une estimation précise de la position et de l'orientation du véhicule, à partir des observations réalisées par le DGPS, de l'estimation de $\widehat{\dot{\psi}}$ effectuée ci-dessus, et des mesures des vitesses longitudinale et transversale.

Du fait de la cadence d'acquisition des observations fixée à 10 Hz, nous proposons d'utiliser un filtre à observations discrètes : alors que la phase de correction est effectuée uniquement lorsqu'une donnée extéroceptive est disponible, la phase de prédiction est cadencée selon l'acquisition des données proprioceptives, soit 50 Hz. Cette solution s'explique par le fait que le DGPS est le capteur le plus précis de la chaîne de mesure et sert par conséquent de référence. Lorsqu'une absence de données DGPS est avérée (du fait d'une zone d'ombre satellitaire par exemple), ou que ces dernières ne sont pas fiables (un indicateur de qualité est renvoyé dans la trame émise par le GPS), la trajectoire est estimée à l'aide du modèle d'évolution introduit dans la section 5.4.6.

5.5.3.1. Modèle d'évolution de l'EKF

On note par $\mathrm{x}_k = [x_k,\ y_k,\ \psi_k]^T$ le vecteur d'état représentant la configuration du véhicule (ou plus exactement du point B de la figure 5.10) à l'instant k. Le modèle d'évolution utilisé dans l'EKF est :

$$\left\{\begin{array}{lcl} x_{k+1} & = & x_k + T_{ech}(V_{L_k}\cos\psi_k - V_{T_k}\sin\psi_k) \\ y_{k+1} & = & y_k + T_{ech}(V_{L_k}\sin\psi_k + V_{T_k}\cos\psi_k) \\ \psi_{k+1} & = & \psi_k + T_{ech}\widehat{\dot{\psi}}_k \end{array}\right. \tag{5.30}$$

Le terme $\widehat{\dot{\psi}}_k$ résulte de l'estimation de la vitesse de lacet par le premier filtre. Ce modèle peut être mis sous la forme :

$$\mathrm{x}_{k+1} = F(\mathrm{x}_k,\ \mathrm{u}_k,\ k) \tag{5.31}$$

où u_k est le vecteur de commande défini par $\mathrm{u}_k = (V_{L_k},\ V_{T_k},\ \widehat{\dot{\psi}}_k)$.

5.5.3.2. Modèle d'observation des mesures du DGPS

Le modèle d'observation **z** découle directement de la modélisation des mesures issues du DGPS en fonction de l'état du système **x**. De manière à simplifier le traitement lors de la fusion, les mesures transmises par le DGPS en coordonnées cartésiennes sont exprimées dans un repère local dont l'origine correspond au point de départ du véhicule. Ce point sera aussi la valeur d'initialisation $(x_0,\ y_0)$ du modèle d'évolution détaillé précédemment.

Cette considération permet d'exprimer très simplement les mesures extéroceptives en fonction de l'état du véhicule par l'expression :

$$\begin{array}{rcl} \mathrm{z}_j & = & H_j(\mathrm{x}_j,\, \mathrm{u}_j) \\ \begin{bmatrix} x_{gps} \\ y_{gps} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathrm{x}_j \end{array} \tag{5.32}$$

5.5.3.3. Modélisation des sources d'erreurs

Les équations précédentes décrivent un système idéal. Or, dans la réalité, les données issues du DGPS ainsi que les entrées de commande sont mesurées avec un bruit qu'il convient de prendre en considération. Par ailleurs, le modèle cinématique sur lequel nous nous appuyons n'est pas exact, et nous choisissons de représenter les imperfections de la modélisation également par un bruit. Reconsidérons à présent le modèle de l'équation (5.31) en supposant qu'il est entâché de bruits :

$$\begin{cases} \mathrm{x}_{k+1} & = & F(\mathrm{x}_k,\, \mathrm{u}_k,\, k) + \alpha_k \\ \mathrm{u}_k^* & = & \mathrm{u}_k + \gamma_k \\ \mathrm{z}_j & = & H_j(\mathrm{x}_j,\, \mathrm{u}_j) + \beta_j \end{cases} \tag{5.33}$$

où :

- α est le bruit d'état (de covariance Q_α) du modèle,
- γ est le bruit d'entrée (de covariance $Q\gamma$) : il indique que les grandeurs du vecteur **u** sont mesurées avec une erreur due aux capteurs,
- β est le bruit (de covariance Q_β) qui affecte les mesures du DGPS,
- u_k^* est la mesure bruitée des grandeurs d'entrée du filtre.

Dans l'ensemble, ces bruits sont supposés blancs, centrés, décorrélés et de variance respective connue.

Afin de bien représenter l'asynchronisme entre les étapes de prédiction et d'estimation, nous allons utiliser par la suite le formalisme présenté ci-dessous. Celui-ci représente la différence des fréquences de mesure par l'intermédiaire d'indices ***i*** et ***j*** différents :

- $\widehat{\mathrm{x}}(i \mid i-1)$ est la prédiction à l'instant i du vecteur d'état calculé à l'aide du modèle d'évolution et de l'état à l'instant i-1,
- $\widehat{\mathrm{x}}(j \mid j)$ représente l'estimation de l'état à l'instant j, où une nouvelle observation est disponible.

5.5.3.4. Etape de prédiction

Cette étape (cf. figure 5.13) est répétée de façon périodique à 50Hz afin de calculer l'état prédit à partir de l'entrée u_k^* (i. e. les mesures des capteurs relatifs). Dans cette phase, deux cas de figure sont envisageables si durant la dernière période d'échantillonnage :

- aucune observation n'a été effectuée, on utilise alors le dernier état prédit pour recalculer la nouvelle prédiction :

$$\widehat{\mathrm{x}}(k+1 \mid k) = F(\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k-1),\, \mathrm{u}^*(k),\, k) \tag{5.34}$$

- une mesure DGPS était disponible à l'instant précédent, on utilise alors la dernière valeur corrigée $\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k)$:

$$\widehat{\mathrm{x}}(k+1 \mid k) = F(\widehat{\mathrm{x}}(k \mid k),\, \mathrm{u}^*(k),\, k) \tag{5.35}$$

L'expression récurrente de la matrice de covariance $P(k+1 \mid k)$ de l'erreur de prédiction est donnée par :

$$P(k+1 \mid k) = A(k)P(k \mid k)A^T(k) + B(k)Q_\gamma B^T(k) + Q_\alpha \tag{5.36}$$

où $A(k)$ et $B(k)$ représentent les matrices jacobiennes définies par les relations (B.2) :

$$A(k) = \frac{\partial F(\mathrm{x},\, \mathrm{u})}{\partial \mathrm{x}} \text{ et } B(k) = \frac{\partial F(\mathrm{x},\, \mathrm{u})}{\partial \mathrm{u}} \tag{5.37}$$

5.5.3.5. Etape de correction

Lorsqu'une mesure extéroceptive valide est disponible, la prédiction de l'état est corrigée (cf. figure 5.13) :

$$\widehat{\mathrm{x}}(k+1 \mid k+1) = \widehat{\mathrm{x}}(k+1 \mid k) + K(k+1)\left[\mathrm{z}(k+1) - H(\widehat{\mathrm{x}}(k+1 \mid k))\right] \tag{5.38}$$

où $K(k+1)$ est le gain de Kalman calculé selon l'équation (5.9) et redéfini par :

$$K(k+1) = P(k+1 \mid k)H^T(k+1)\left[H(k+1)P(k+1 \mid k)H^T(k+1) + Q_\beta(k+1)\right]^{-1} \tag{5.39}$$

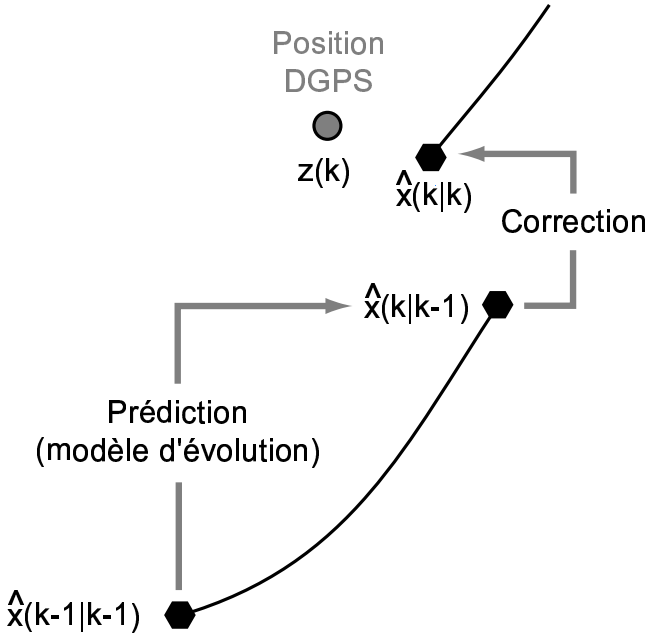


FIG. 5.13. : Principe de prédiction-correction

Les détails du système implémenté sont présentés dans l'annexe B. Les résultats sont décrits dans le chapitre 6 consacré aux validations expérimentales.

5.6. Localisation et modélisation du profil routier

5.6.1. Contexte

Dans la localisation du véhicule, le positionnement est une première étape qui demeure cependant insuffisante pour définir l'environnement d'évolution. La connaissance du contexte est primordiale pour envisager une aide à la conduite comme celle de NAICC. Cette connaissance peut être obtenue en couplant le procédé de positionnement à une base de données cartographique dans laquelle sont stockées les caractéristiques du profil routier. C'est classiquement suivant ce principe que fonctionnent les systèmes de navigation embarqués, qui équipent actuellement de série certaines berlines haut de gamme.

La volonté d'effectuer une régulation assistée par un dispositif de localisation se traduit par deux impératifs de performance, l'un au niveau du positionnement par fusion multisensorielle, l'autre au niveau de la fidélité de modélisation du réseau routier. L'évolution technologique à laquelle on a assisté ces dernières années a rapidement laissé entrevoir ce type d'aide basée sur un système de navigation [YUH98, SHL98, TEX99, BAS99]. Pourtant, alors que l'on recense un grand nombre de travaux se consacrant au positionnement précis d'un véhicule, peu de publications s'intéressent à la génération de base de données suffisamment précises pour envisager de tels dispositifs. Dès lors, il devient délicat d'effectuer une prospection sur les solutions potentiellement envisageables en

matière de numérisation du profil routier. Le nombre d'applications potentielles (cf. tableau 5.2) utilisant ou nécessitant l'emploi d'une cartographie routière adaptée permet néanmoins de penser que des solutions sont/vont être envisagées, et que celles-ci s'orientent vers une extension du contenu des bases de données.

Les bases de données couramment disponibles ont, pour la plupart, été développées pour des systèmes de navigation et ne sont pas adaptées pour des dispositifs tels que présentés dans le tableau 5.2. Dès lors, de nouvelles bases, fondées sur des méthodes de modélisation du profil plus élaborées et contenant également des informations supplémentaires, sont nécessaires. Ainsi, deux projets européens connexes ont récemment été menés en vue de définir les besoins inhérents aux DAC s'appuyant sur une cartographie numérique. En fonction de l'application recherchée, les précisions et les informations requises diffèrent et il convient donc de définir de manière précise l'ensemble des besoins.

Dans un premier temps, Fiat, TRD, TÜV, VTI, TNO, Siemens Automotive, Navigation Technologies, Renault, Volvo et le Fraunhofer IAO ont mené, d'Avril 1998 à Juillet 2000, le projet *IN-ARTE.* Les objectifs de ce consortium étaient [SAR98] :

- d'accroître la sécurité extra-urbaine et sur autoroutes en implémentant de nouveaux DAC couplant une aide à la navigation (**basée sur une cartographie améliorée**) à un régulateur de vitesse (ACC),
- de concevoir une architecture globale sous forme de plate-forme expérimentale et d'évaluer les performances de cette catégorie d'aide.

Parallèlement, le projet *NextMAP* (collaboration entre ERTICO[10], BMW, DaimlerChrylser, Jaguar, Fiat, Renault, Navigation Technologies et Tele Atlas) mené entre Janvier 2000 et Décembre 2001 a eu pour objectifs [PAN02] :

- d'identifier les éléments d'une base de données nécessaires aux DAC en cours de réalisation (ACC, "*Curve Warning System*", "*Curve Speed Control*"...),
- d'évaluer les faisabilités techniques et économiques des bases de données nouvelle génération,
- de formaliser ces spécificités afin d'envisager une extension du standard de représentation cartographique[11].

Application	2001	2004	2006	2008	2010	2012
Curve Speed Warning		X				
Adaptive Front Lighting		X				
Vision enhancement		X				
Speed Limit Assistant		X				
Fuel Consumption Optimization		X				
(Hybrid) Powertrain Management		X				
Adaptive Cruise Control		X	X			
Curve Speed Control			X			
Visual and Audible Driver Assistance			X			
Collision Warning			X	X		
Stop & Go				X		
Lane-road Departure Warning					X	
Lane Keeping Assistant					X	
Lane Change Assistant					X	
Collision Avoidance						X
Autonomous Driving						X

TAB. 5.2.: Applications basées sur l'utilisation d'une cartographie selon [PAN02]

Lors du démarrage du projet NAICC, aucune cartographie satisfaisante n'était disponible ou en cours de réalisation. L'alternative que nous avons proposée consiste à développer une base de données spécifique, satisfaisant aux exigences du projet. Nous avons constaté dans les chapitres précédents, que **l'information de**

[10] *European Road Telematics Implementation Coordination Organization*

[11] Un standard ISO, le GDF ("*Geographic Data File*") régit actuellement la structure des bases de données des systèmes de navigation.

courbure de la route revêt un aspect primordial pour l'ensemble de l'application. Plutôt que d'utiliser des techniques d'estimation de cette information [JOU99], nous avons choisi d'intégrer cette donnée parmi les éléments contenus dans la base de données. Nous estimons en effet que l'adaptation des bases de données actuelles pour leur utilisation dans des dispositifs d'assistance se fera par l'intégration d'informations de ce type. Nos hypothèses sont d'ailleurs confortées par les récents travaux publiés par le consortium *NextMAP* [LOE02].

Par ailleurs, pour modéliser le réseau routier, notre choix s'est orienté vers des **courbes paramétriques qui approximent la voie centrale et par la même, sa courbure**. La connaissance de quatre points est suffisante pour la construction des courbes de Bézier sur lesquelles est fondée notre base de données. Des techniques traditionnelles de représentation par segmentation procurent une précision d'environ 15 mètres. Celles-ci nécessitent un grand nombre de segments et par conséquents le stockage d'un grand nombre de points de jonction entre les segments afin d'approximer convenablement la courbure [ZHA97]. Les premières bases de données développées pour les systèmes de navigation par la société américaine NavTech garantissaient une erreur maximale de 10 mètres sur la position des points de transition [MAR89]. Le critère principal considéré dans la réalisation de la cartographie de NAICC concerne la **fidélité de modélisation de la géométrie du profil**. L'ensemble de nos travaux sont fondés sur la courbure du profil routier[12] et il est par conséquent primordial de disposer de cette information de manière fiable. L'accroissement de la précision de modélisation du réseau routier ne doit cependant pas se faire au détriment des ressources mémoires nécessaires. C'est pourquoi, une solution (courbes paramétriques) limitant ces besoins, mais nécessitant un calcul en ligne du profil, a été choisie. Finalement, nous n'aborderons pas les procédés de stockage permettant d'optimiser les accès aux informations, comme cela est le cas pour des cartographies commerciales.

Cette section présente la technique retenue qui consiste, à partir d'un relevé préalable effectué à l'aide du système DGPS centimétrique, de construire la base de données nécessaire pour le DAC. Les données de la voie centrale mesurées par le DGPS sont utilisées pour définir les courbes de Bézier représentatives des portions de routes (lignes droites et virages). Afin de pouvoir traiter rapidement des relevés complexes, un module de génération automatique a été écrit : par approximations successives, celui-ci définit la courbe de Bézier satisfaisant à un critère de proximité avec le profil mesuré. L'optimisation est basée sur l'utilisation des algorithmes génétiques (AG).

5.6.2. Courbes de Bézier

Notre choix s'est porté sur les courbes de Bézier [BEZ87, LEO91] plutôt que les splines car, contrairement à l'objectif du chapitre 3 qui est de définir une courbe en imposant des points de passage, il s'agit ici d'obtenir une fonction mathématique correspondant au mieux à une courbe donnée. De plus, il est aisé de maîtriser l'optimisation d'une courbe de Bézier par le choix de seulement quatre points alors qu'il est beaucoup plus contraignant de contrôler la fonction mathématique existant entre deux points d'interpolation d'une spline.

Cette famille de courbes a été proposée par Pierre Bézier dans un but précis visant à faciliter la description des formes complexes dans les domaines de la CAO et la CFAO. De nombreux logiciels de représentation vectorielle utilisent ces courbes (Adobe Illustrator par exemple).

5.6.2.1. Polygône de contrôle

Cette famille de courbes se définit à l'aide de 4 points, représentant le polygone caractéristique (AMNB) comme le montre la figure 5.14. Le principe réside dans la volonté de définir une courbe connaissant deux points, en imposant la pente de la courbure en ces deux points (T_0 en A et T_3 en B).

Les points $A(x_0, y_0)$ et $B(x_3, y_3)$ sont appelés "*points d'ancrage*" et $M(x_1, y_1)$ et $N(x_2, y_2)$ "*points de contrôle*". Les deux vecteurs $\overrightarrow{AM}$ et $\overrightarrow{BN}$ définissent complètement une courbe de Bézier.

5.6.2.2. Polynômes de Bernstein

La structure paramétrique des courbes de Bézier fait appel aux polynômes de Bernstein :

[12] Le modèle de trajectoire utilisé pour l'asservissement latéral se base sur une propriété de continuité de la courbure sur l'ensemble du trajet. Par ailleurs, la vitesse de consigne définie pour la commande longitudinale est déterminée en fonction de la courbure.

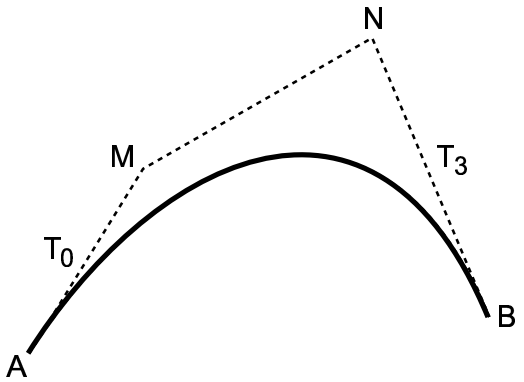


FIG. 5.14. : Représentation d'une courbe de Bézier : pentes et points d'ancrage

$$\beta_{i,m}(u) = \sum_{j=0}^{m} (-1)^{i+j} C_i^m C_i^j u^j = \sum_{j=0}^{m} C_i^m u^i (1-u)^{m-i} \tag{5.40}$$

avec

$$C_i^m = \frac{m!}{i!(m-i)!} \tag{5.41}$$

Dans notre cas comme dans la plupart des utilisations des courbes de Bézier, nous utiliserons des polynômes de degré 3. Pour $m = 3$ on a donc :

$$\begin{array}{l} \beta_{0,3}(u) = (1-u)^3 = -u^3 + 3u^2 - 3u + 1 \\ \beta_{1,3}(u) = 3u(1-u)^2 = 3u^3 - 6u^2 + 3u \\ \beta_{2,3}(u) = 3u^2(1-u) = -3u^3 + 3u^2 \\ \beta_{3,3}(u) = u^3 \end{array} \tag{5.42}$$

5.6.2.3. Définition d'une courbe de Bézier

Soient (x_0, y_0), $(x_1, y_1), \cdots$, (x_m, y_m) $m+1$ points dans un plan. La courbe de Bézier associée au polygône passant par ces points est donnée par :

$$\begin{aligned} X &= P_x(t) = \sum_{i=0}^{m} \beta_{i,m}(t) x_i \\ Y &= P_y(t) = \sum_{i=0}^{m} \beta_{i,m}(t) y_i \end{aligned} \tag{5.43}$$

où $\beta_{i,m}$ désigne le polynôme de Bernstein, $t \in [0, 1]$.

Une caractéristique primordiale dans notre application concerne la raison t : le nombre de points représentants finalement la courbe paramétrique est fonction du pas de variation de la raison. Par conséquent, **en jouant sur la raison, la définition de la courbe (et donc de la base de données) peut être ajustée pour chaque portion de route**. Par ailleurs, pour des tracés rectilignes nous pourrons définir un pas de variation plus grand (et de fait réduire la charge de calcul et la précision de reconstruction) ou augmenter la précision localement, par exemple dans le cas d'un virage.

5.6.3. Modélisation du profil routier

5.6.3.1. Détermination des points d'ancrage

Une courbe de Bézier possède la faculté d'approximer un grand nombre de courbes, et principalement celles que l'on retrouve sur un profil routier. Il va de soi qu'une seule représentation de Bézier ne peut cependant approximer un profil complexe. Il convient donc d'effectuer un premier découpage du fichier DGPS pour isoler les sections de lignes droites des virages. Par la suite, on détermine la courbe paramétrique approximant au mieux (suivant un critère d'erreur quadratique) chaque portion.

La segmentation du tracé DGPS peut s'effectuer suivant deux procédés, en fonction des mesures disponibles :

1. en s'appuyant sur les informations des capteurs proprioceptifs[13], une approximation de la courbure du tracé en chaque point (i) est déterminée (cf. relation (5.44)) et le tracé DGPS est ensuite découpé en fonction de cet indicateur,

$$\kappa(i) \simeq \frac{\gamma_T(i)}{V_L^2(i)} \tag{5.44}$$

2. pour N points DGPS donnés, on détermine le rayon d'un arc de cercle passant par les points 1, N et $(N+1)/2$; si le rayon est supérieur à une valeur prédéfinie, la portion est considérée comme étant une ligne droite et comme une courbe dans le cas contraire. Cette technique nécessite néanmoins l'ajustement du paramètre N suivant le parcours traité (suivant les rayons maximaux des virages).

5.6.3.2. Algorithme d'optimisation

L'emploi des algorithmes génétiques pour le calage d'une courbe de Bézier a déjà fait l'objet de travaux relatifs à l'étude comportementale du véhicule. Dans ces derniers, la mise en œuvre des AG et des techniques nécessaires à la convergence vers une solution convenable sont très largement abordées. On pourra se référer aux travaux de thèse de Laurence [LAU98] qui détaille la méthodologie que nous avons utilisée pour aboutir à la modélisation du profil.

Par ailleurs, dans le chapitre 6, nous présentons la modélisation d'un circuit qui a été le cadre d'une démonstration des projets menés au sein de notre équipe. Dans cette partie, sera tout d'abord abordé la segmentation (pour la détermination des points d'ancrage) du circuit complet. Dans un deuxième temps, nous illustrons la génération, pour quelques une de ces sections, des courbes de Bézier optimisées par AG.

5.6.3.3. Structure de la base de données

Parallèlement aux données relatives aux courbes de Bézier, d'autres informations sont intégrées dans le fichier de description qui compose la base. Celles-ci ont plusieurs objectifs :

- permettre la construction de profils complexes en indiquant par exemple les intersections entre différentes routes,
- renseigner sur les caractéristiques des tronçons : certaines données comme la longueur d'une ligne droite, la courbure d'un virage, son secteur angulaire... sont des indicateurs primordiaux sur lesquels se focalise le DAC pour définir la criticité de la situation et déterminer la référence de vitesse (assistance longitudinale) et/ou de trajectoire (assistance latérale),
- définir, en fonction de la nature des routes, les informations règlementaires associées et principalement les vitesses autorisées.

Une structure en couches a été adoptée pour la description de profils complexes. On définit une route $\boldsymbol{R}$ par l'ensemble des tronçons $\boldsymbol{T}$ (chacun étant représenté par une courbe de Bézier) contenus entre deux intersections. Un identificateur est affecté à chaque route afin de définir les intersections entre les différentes routes à l'aide d'une table de correspondance.

[13] qui ont l'avantage d'être synchronisés avec les données issues du DGPS grâce au système d'acquisition.

5.6.4. Localisation par corrélation cartographique

La corrélation cartographique ("*map matching*") est employée dans les systèmes de navigation pour, à partir de la position absolue définie généralement par un procédé de fusion, localiser le véhicule sur une carte routière digitalisée. Ce procédé ne requiert pas de capteur particulier et est essentiellement basé sur des traitements informatiques des informations. Cette localisation est primordiale pour fournir au conducteur des informations pertinentes quant à sa situation et son parcours.

Par ailleurs, cette technique peut aussi être utilisée afin de corriger les erreurs de positionnement commises par exemple lorsqu'une perte des informations DGPS est avérée. Lorsque tel est le cas, seule la phase de prédiction de l'EKF est effectuée et la précision peut se dégrader rapidement (cf. chapitre 6). Une solution consisterait à corriger la prédiction à partir de la dernière localisation.

De nombreuses techniques de corrélation cartographique ont été développées depuis l'émergence des systèmes de navigation. On distingue ainsi les solutions :

- ***géomètriques*** : on recherche en général un point ou une courbe la plus proche de la position du véhicule,
- ***topologiques*** : les méthodes topologiques utilisent la connaissance *a priori* du déplacement du véhicule et recherchent une route dont le profil est proche de la trajectoire du véhicule,
- par filtrage de Kalman, logique floue, réseaux neuronaux, théorie de l'évidence [JO96, ZHA97, NAJ02] ...

Une description détaillée de ces méthodologies et de leurs performances peut être trouvée dans [BER98, ZHA97, GRE02].

Notre objectif n'est pas de mettre au point une nouvelle technique de corrélation cartographique mais uniquement d'obtenir, à partir du positionnement par fusion multisensorielle et de la base de données définie ci-dessus, la localisation du véhicule. Ainsi nous pourrons définir les phases de conduite qui nécessiteront de fournir une assistance au conducteur.

Le principe de corrélation cartographique implémenté sur le véhicule réside simplement en la recherche du point de la base de données le plus proche du véhicule, et cela à une cadence de 50 Hz.

5.7. Conclusion

Ce chapitre a fait état des travaux s'inscrivant dans un contexte de localisation pour l'assistance à la conduite. Ainsi, la détermination de la position d'un véhicule n'est pas la finalité du projet NAICC, mais la base de ce dernier. L'assistance au conducteur et, à plus long terme, l'automatisation de certaines tâches de conduite ne peuvent être envisagées qu'à partir d'une information de localisation précise.

De nombreuses méthodes de positionnement par fusion multi-capteurs ont été abordées, que ce soit pour le positionnement de robots autonomes ou pour la mise au point de systèmes de navigation actuellement sur le marché. Accouplées à une cartographie numérique du réseau routier, ces techniques sont à présent suffisamment fiables pour garantir une localisation dans des conditions aussi variées que la conduite urbaine, péri-urbaine ou exrta-urbaine. Le **filtre de Kalman**, employé dans la majorité des applications de ce type, a également été retenu ici, principalement du fait qu'il offre un compromis intéressant entre performances et facilité de mise en œuvre. La fusion d'informations extéroceptives (provenant d'un GPS en mode différentiel) et d'informations proprioceptives (relatives aux vitesses linéaires et angulaire du véhicule) fournit une estimation de la position à 50 Hz.

Par ailleurs, la précision de **modélisation du profil routier** demeure encore une limitation au développement de cette catégorie de DAC. Depuis près d'une dizaine d'années, de nombreux chercheurs songent au développement d'assistances capables d'adapter automatiquement la conduite d'un véhicule à son environnement d'évolution. Ces projets n'ont pu être concrétisés du fait de l'**imprécision et de l'incomplétude des informations contenues dans les bases de données**.

C'est pourquoi, nous nous sommes attachés, pour le projet NAICC, à définir une technique de modélisation du profil routier permettant de coupler deux critères primordiaux :

- garantir une précision du modèle en adéquation avec l'objectif d'assistance active,
- limiter les ressources mémoires nécessaires au stockage de la base de données.

L'emploi de **courbes de Bézier** nécessitant uniquement de définir 4 points pour représenter une section (virages ou lignes droites) semblent être un compromis intéressant. Contrairement aux représentations à base de "noeuds" et points caractéristiques ("*shape points*"), cette méthode ne nécessite pas un stockage de données supplémentaires pour définir convenablement une section courbe. De plus, elle correspond à la **volonté/nécessité de représentation de la courbure du profil**, nécessaire à la fois pour les assistances latérale et longitudinale présentées dans les chapitres 3 et 4. Les consignes de vitesse et de trajectoire sont en effet établies principalement à partir de ce critère.

L'enjeu du développement d'une nouvelle génération de cartographie routière de précision accrue est devenu considérable tant les applications envisageables sont nombreuses. On citera par exemple l'AFS ("*Advanced Front-lighting System*"), i. e. le contrôle de l'orientation des phares d'un véhicule. Si on trouve déjà sur le marché des véhicules dont les phares sont orientables en fonction des sollicitations au volant, le couplage de ce procédé à une base de données pourrait permettre d'anticiper une prise de virage, d'ajuster la forme du faisceau de lumière à la situation de conduite (large lorsque le véhicule arrive à une intersection...) ou d'informer le conducteur du chemin à prendre en fonction du trajet déterminé par le dispositif de navigation...

Chapitre 6

Résultats expérimentaux

"En théorie, il n'y a pas de différence entre la théorie et la pratique, mais en pratique, il y a une différence."

Christophe Thibierge

Sommaire

6.1. Introduction 125
6.2. Plate-forme expérimentale NADINE 126
6.2.1. Objectifs 126
6.2.2. Architecture matérielle 127
6.2.3. Capteurs proprioceptifs 128
6.2.4. Capteur extéroceptif : le DGPS 129
6.2.5. Organe de commande : le régulateur de vitesse 131
6.2.6. Transmission des données 132
6.3. Architecture logicielle d'acquisition et de commande 134
6.3.1. Schéma d'exécution 135
6.3.2. Systèmes et logiciels embarqués : l'approche orientée objet 135
6.3.3. Architecture globale d'acquisition et de commande 136
6.3.4. Application à l'acquisition et à la commande embarquées 138
6.4. Validation de la fusion multisensorielle 139
6.4.1. Estimation de la vitesse de lacet et de l'angle de lacet 139
6.4.2. L'EKF pour la fusion DGPS-mesures extéroceptives 141
6.4.3. Modélisation du profil routier 144
6.5. Génération de trajectoires pour la commande latérale 146
6.5.1. Modélisation de trajectoires 146
6.5.2. Génération automatique de trajectoires 147
6.6. Régulation de vitesse assistée par un dispositif de localisation 148
6.6.1. Implémentation pour la validation embarquée 148
6.6.2. Simulation 150
6.6.3. Test embarqué 152
6.7. Conclusion 153

6.1. Introduction

Ce chapitre traduit le caractère applicatif fort de cette thèse. Avant de présenter les différents résultats obtenus au cours de ces travaux, nous décrivons dans un premier temps l'instrumentation du véhicule effectuée

spécifiquement pour le projet NAICC. Des solutions illustrant la volonté de réutilisabilité et d'évolutivité ont été retenues tant au niveau de l'architecture matérielle (cf. §6.2) que logicielle (cf. §6.3). Celles-ci garantissent à présent la facilité d'interconnection des systèmes.

Sur la base de cette plate-forme expérimentale, les différentes étapes de NAICC, et principalement l'axe longitudinal, ont fait l'objet de validations. Ainsi, nous présentons successivement dans ce chapitre :

- les résultats du dispositif de localisation du véhicule par fusion multisensorielle,
- la discrétisation d'un profil routier par courbes de Bézier,
- la génération du profil de vitesse en fonction de la topologie de la route,
- les résultats de simulations de modèles de trajectoires pour les deux catégories de conducteurs étudiés au chapitre 3.

6.2. Plate-forme expérimentale NADINE

6.2.1. Objectifs

La mise en pratique des recherches effectuées a été un aspect important durant cette thèse. Il est en effet important de se rendre compte des résultats réels d'un algorithme de localisation ou de commande si l'objectif clairement avoué est l'augmentation du confort et de la sécurité routière. Par ailleurs, cette méthodologie permet également de définir l'applicabilité et surtout "l'intégrabilité" des concepts avec l'utilisation des technologies actuelles et émergentes dans le domaine de l'automobile.

Le projet NAICC a donc été mené en parallèle avec l'instrumentation d'un véhicule Renault Scenic 2.0L à boîte de vitesses automatique (cf. figure 6.1) [GIS02]. L'objectif est à terme d'intégrer une architecture complète d'acquisition et de commande sur laquelle des DAC de différents niveaux (assistance passive jusqu'à la conduite automatisée) puissent être élaborés. D'autres utilisations du véhicule sont également à envisager dans le cadre des projets de recherche de l'équipe MIAM.

Une architecture fonctionnelle a été développée afin de garantir une intégration et une utilisation aisées de la fonctionnalité première recherchée : la régulation de vitesse assistée par un système de localisation. L'intérêt de cette structure réside dans :

- sa **modularité** : les technologies et techniques retenues tant au niveau du traitement de l'information que de sa transmission garantissent la fiabilité de tout ou partie du dispositif d'acquisition et de commande,
- son **extensibilité/évolutivité** : de part sa modularité, l'évolutivité du système est intrinsèque, des composants (matériels et/ou logiciels) pouvant être ajoutés, supprimés voire modifiés aisément.



FIG. 6.1. : Véhicule expérimental

Finalement, l'architecture définie pour l'instrumentation de ce véhicule devait répondre à une exigence primordiale : la rapidité de mise en œuvre des algorithmes élaborés. Afin d'éviter de longues périodes de développement et d'intégration des modèles principalement développés sous Matlab/Simulink par les chercheurs du laboratoire, la solution retenue devait permettre une implémentation rapide sur le véhicule.

Cette partie a pour but de synthétiser les choix et développements (matériels mais également logiciels) qui ont été effectués en tenant compte des exigences d'ouverture, de souplesse et d'évolutivité de l'instrumentation du véhicule. Elle dressera donc un bilan succint des capteurs, effecteurs et dispositifs d'acquisition implantés notamment pour le développement du régulateur de vitesse assisté par un système de navigation. Elle illustrera également l'architecture logicielle orientée objets développée.

6.2.2. Architecture matérielle

La figure 6.2 illustre l'architecture globale de l'instrumentation relative à NAICC. Celle-ci met en avant les 4 modules fonctionnels implémentés :

- module "**acquisition de données**" : réunit l'ensemble des capteurs implantés sur le véhicule (DGPS, centrale inertielle, capteur de vitesse...),
- module "**exécution** (**traitement de l'information**)" (cf. §6.2.6) : a pour objectif, à partir des données mesurées, de définir les actions de commande à transmettre au module de commande ainsi que les informations à fournir au conducteur,
- module "**supervision**" : correspond à l'interface NAICC-utilisateur et se limite à l'écran de contrôle implanté dans le véhicule et permettant de visualiser l'évolution du système,
- module "(**organes de**) **commande**" : regroupe l'ensemble des effecteurs utilisés pour l'assistance à la conduite. On y retrouve donc le régulateur de vitesse utilisé dans l'axe longitudinal (cf. §6.2.5).

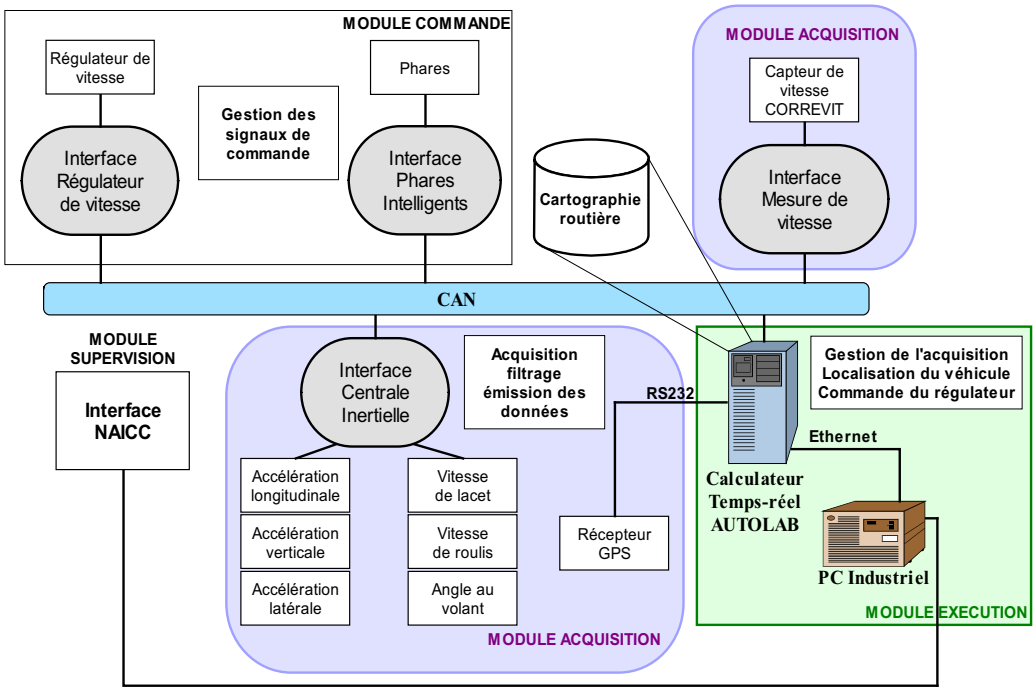


FIG. 6.2. : Architecture du véhicule NADINE

L'ensemble du dispositif est structuré autour d'un bus CAN spécialement mis en œuvre pour le projet (cf. §6.2.6). Hormis le capteur de vitesse, la majorité des composants ne disposent pas, à l'origine, d'une interface vers ce bus. Par ailleurs, le régulateur de vitesse (produit générique intégrable sur une grande majorité de

véhicules) n'est pas conçu pour l'utilisation qui en est faite, i. e. commandé à l'aide d'une station d'acquisition et de commande. Nous avons alors développé l'interface nécessaire (cf. §6.2.5).

Le véhicule expérimental intègre une instrumentation diversifiée, distribuée à plusieurs endroits dans le véhicule et composée de :

- 3 accéléromètres (destinés à mesurer les accélérations longitudinale, transversale et verticale),
- 2 gyromètres (mesurant les vitesses de rotation suivant les axes vertical et longitudinal),
- 1 capteur optique pour la mesure des vitesses longitudinale et transversale,
- 1 dispositif de mesure de l'angle au volant,
- 1 système de positionnement satellitaire DGPS,

Les accéléromètres et gyromètres sont regroupés dans une centrale inertielle (cf. figure 6.3). Son rôle est d'effectuer une conversion analogique/numérique ainsi qu'un filtrage des mesures avant de les transmettre au système d'acquisition (cf. §6.2.6). La centrale a été installée près du centre de gravité du véhicule, au niveau du levier de vitesse. Du fait de cette disposition très avancée (proche du tableau de bord), nous avons choisi d'y ajouter la gestion de l'angle au volant.

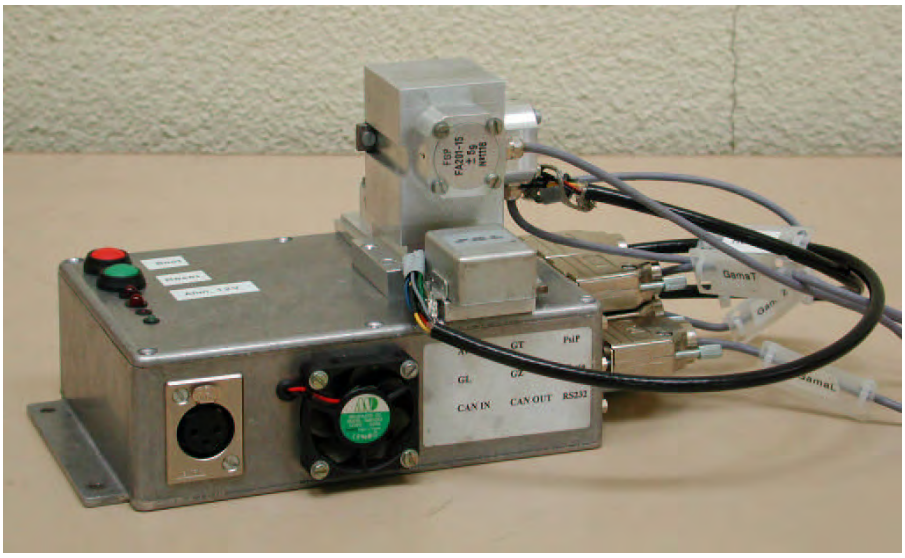


FIG. 6.3. : Centrale inertielle du véhicule NADINE

6.2.3. Capteurs proprioceptifs

Quatre catégories de capteurs définissant l'état du véhicule sont implantées sur le véhicule expérimental du MIAM :

Accéléromètre

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

Le principal problème de l'accéléromètre lorsqu'il est utilisé pour la localisation est qu'il nécessite une double

intégration pour obtenir la position du véhicule. Or, son signal de sortie est caractérisé par un bruit haute-fréquence important. Dès lors, cette estimation se trouve souvent entachée d'une erreur considérable.

Gyromètre

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

$$F = 2mv\Omega$$

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

Concernant le véhicule NADINE, deux gyromètres (Murata ENV-05D) ont été utilisés afin de mesurer la vitesse de rotation selon les axes vertical (vitesse de lacet) et longitudinal (vitesse de roulis). Outre son faible coût, le principal avantage de ce type de capteur réside dans sa robustesse puisqu'il ne comporte aucune pièce mécanique en mouvement.

Capteur de vitesses

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

Capteur d'angle de braquage

L'information "angle au volant" évolue linéairement en fonction du temps et se caractérise, selon le rapport de démultiplication de la colonne de direction, par plusieurs rotations complètes du volant pour braquer les roues directrices d'une butée à l'autre. La base d'un capteur capable de recueillir cette information peut être un simple potentiomètre multitours de précision. Comme il est impossible de monter directement ce potentiomètre sur le moyeu du volant, il est nécessaire de le déporter par l'intermédiaire d'un système d'engrenages. Ainsi, une couronne dentée fixée directement sur l'axe du volant entraîne un second engrenage dont l'axe de rotation est solidaire de l'axe du potentiomètre.

Un dispositif, illustré sur la figure 6.4, a été spécifiquement développé par Renault afin de minimiser les interventions relatives à l'installation. Celui-ci intègre le potentiomètre et les roues dentées. Il suffit, pour le montage, de retirer le volant et de glisser le bloc sur la colonne de direction avant de reposer le volant. L'utilisation d'un simple potentiomètre a l'avantage d'être une solution peu coûteuse, robuste et assure un dépannage rapide (changement aisé du potentiomètre).

6.2.4. Capteur extéroceptif : le DGPS

Avec l'objectif de la localisation du véhiucle, celui-ci est équipé d'un unique capteur de positionnement absolu qui est un GPS. Le "*Global Positionning System*" est un système de positionnement par satellites créé par l'armée américaine dans le contexte de la guerre froide, mais qui est très rapidement apparu sur le marché des civils.



FIG. 6.4. : Dispositif de mesure de l'angle de braquage

Principe du positionnement par GPS

Le GPS est constitué de 3 parties :

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

Un GPS fournit traditionnellement, et au minimum, une position, une vitesse et un temps. La position est fournie soit en données angulaires (latitude / longitude), soit en données métriques suivant la grille UTM (Universal Traverse Mercator). Celle-ci est une projection permettant de mettre à plat la surface terrestre en la découpant en carrés de 1 km de côté. Le principe du positionnement GPS se base sur la mesure de distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues. On définit ainsi des sphères centrées sur des satellites et dont l'intersection donne la position de l'utilisateur. Le récepteur GPS est capable d'identifier le satellite qu'il utilise à l'aide d'un signal pseudo-aléatoire émis par chaque satellite. Il obtient, à l'aide de ce signal, les informations sur l'orbite et la position du satellite. Pour mesurer la distance qui sépare le satellite du GPS, on mesure le temps mis par le signal pour aller de l'un vers l'autre.

L'inconvénient majeur du système GPS réside dans le fait que les satellites doivent être visibles par le récepteur, ce qui est fréquemment le cas en rase campagne, mais beaucoup plus rarement en zone urbaine. On parle dans ce cas de zone d'ombre satellitaire.

Sources d'erreurs

Plusieurs sources d'erreurs peuvent être à l'origine des imprécisions obtenues par mesures GPS [COO94] :

- L'horloge interne du satellite. Bien qu'étant une horloge atomique, elle est tout de même source d'erreur,
- La dégradation volontaire (*"Selective Availability"*) : c'est la principale source d'erreur, elle permet à l'armée américaine de préserver un avantage de précision sur les civils. Cette dégradation artificielle des signaux émis par les satellites a été suspendue au 1er Mai 2000 mais peut être réactivée à tout moment,
- Les éphémérides : il faudrait prendre en compte le déplacement des satellites sur leur orbite, alors que les calculs théoriques partent du principe qu'il est fixe,

– La traversée atmosphérique : lorsque le signal traverse l'atmosphère, il ralentit, provoquant une erreur sur le calcul de distance,

– La réverbération : le signal ne parvient pas toujours directement jusqu'au récepteur, il peut être dévié par des obstacles, faussant ainsi les calculs (en montagne notamment),

– L'horloge du récepteur : peu précise.

Le GPS différentiel (DGPS)

Pour certaines applications particulières, la précision obtenue par le GPS traditionnel (de l'ordre de quelques mètres actuellement) n'est pas suffisante... il ne s'agit pas d'atterrir à 50 m de la piste ! Rapidement, le besoin d'une précision accrue s'est fait sentir, c'est ainsi qu'a été créé le GPS différentiel (*"Differential GPS"* ou *DGPS* en anglais). Une station fixe de position géographique connue effectue des relevés GPS simultanément avec la station mobile. Se basant sur ses coordonnées réelles et celles établies par les informations des satellites, la station de référence détermine les corrections pour chaque satellite visible. Les stations mobile et fixe se trouvant géographiquement proches, elles utilisent les mêmes satellites et les corrections de la référence peuvent ainsi être appliquées sur la station mobile. Un positionnement centimétrique peut de cette manière être obtenu lorsque le GPS utilise la technique du *"Real Time Kinematic"* (*RTK*). Des détails sur les différents modes opératoires du système GPS ou de son équivalent russe le GLONASS pourront être trouvés dans [BOT97, SUK00].

6.2.5. Organe de commande : le régulateur de vitesse

Dans le cadre de la mise en œuvre de NAICC, le seul organe de commande sur lequel nous intervenons pour l'instant est le papillon d'arrivée d'essence. Pour ce faire, nous utilisons un régulateur de vitesse spécialement installé pour les besoins de ces travaux.

Description générale

Initialement, le régulateur est constitué de 3 éléments :

– une télécommande à transmission "hautes fréquences" (HF) qui permet au conducteur de commander le régulateur (marche/arrêt, sélection de la consigne...),

– un récepteur HF localisé sous le tableau de bord et dont le rôle est d'interpréter les ordres émis par la télécommande afin de les transmettre à l'actionneur d'angle papillon,

– un actionneur d'angle papillon : moteur asservi par un PI et agissant sur l'ouverture du papillon d'essence pour réguler la vitesse.

Interfaçage avec le système d'acquisition et de commande

Un travail a consisté à créer une interface permettant de connecter le régulateur de vitesse sur le bus CAN afin de pouvoir le commander à l'aide de l'"Autolab" (système d'acquisition et de commande) [GIR02]. Le rôle de ce dernier consiste donc à émuler les signaux de la télécommande habituellement utilisée. La structure décrite sur la figure 6.5 a été développée.

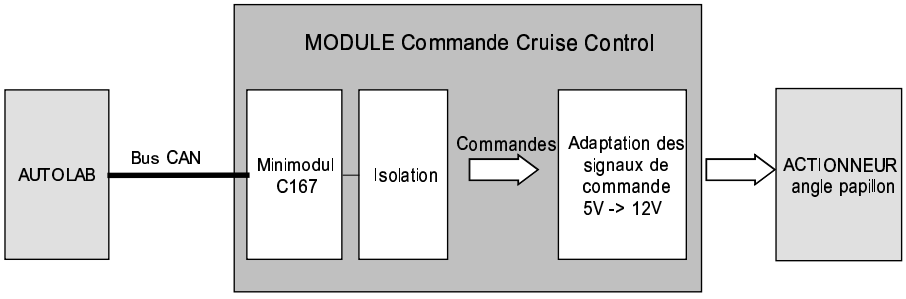


FIG. 6.5. : Commande du régulateur par l'"Autolab"

Une carte à base de micro-contrôleur C167 d'Infinéon a été utilisée pour réaliser l'interface avec le bus CAN. Cette interface est constituée d'une carte qui s'enfiche directement sur le support du micro-contrôleur, comme l'illustre la figure 6.6. Finalement, à l'aide de ce module, NAICC est en mesure :

1. de mettre en marche ou d'arrêter le régulateur,
2. de programmer une consigne de vitesse,
3. d'accélérer ou de ralentir (avec un potentiel de décélération fonction du frein moteur),

Par ailleurs, l'ensemble des fonctions de sécurité du dispositif ont été conservées (mise hors fonctionnement lors d'un appui sur le frein...)

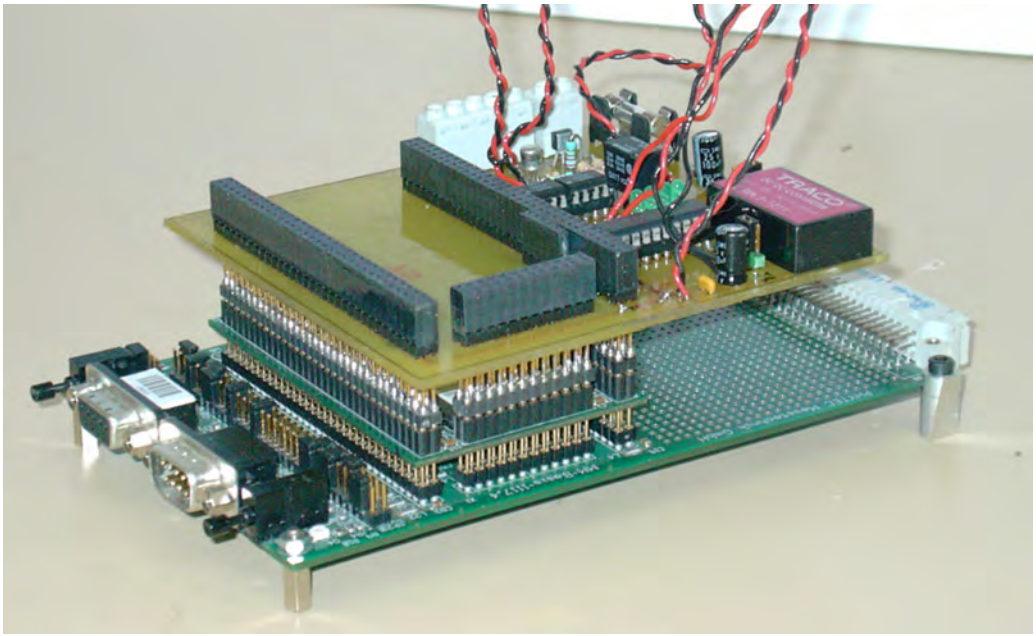


FIG. 6.6. : Module de commande de l'actionneur "angle papillon" selon [GIR02]

6.2.6. Transmission des données

Bus CAN

Devant l'émergence des dispositifs électroniques embarqués (multiples calculateurs, assistances au conducteur...), les constructeurs ont été contraints de redéfinir les principes de transmission de signaux. On voit de plus en plus fréquemment des véhicules intégrant des concepts comme le multiplexage pour, d'une part diminuer la quantité de supports de transmission nécessaires, et d'autre part fiabiliser la transmission. Cette émergence de bus de terrain dans l'automobile facilite l'intégration de nouveaux modules et garantit une plus grande souplesse d'utilisation. Chaque organe connecté sur le bus peut être en mesure de disposer des informations d'autres dispositifs partageant le même mode de communication.

Ainsi, à la fin des années 80, la société Robert Bosch GmbH a développé le CAN (*"Controller Area Network"*), un bus de terrain série. L'objectif était de fournir à l'industrie automobile un mode de transmission peu coûteux pour l'électronique embarquée. Aujourd'hui, sa robustesse et son efficacité l'ont amené à être utilisé dans de nombreuses autres applications industrielles. Les principaux attraits de ce bus sont :

1. sa standardisation par l'ISO (*"International Standard Organization"*) et son intégration dans le modèle à 7 couches ISO/OSI[1] [PAR96],
2. le support efficace du contrôle en temps-réel de systèmes distribués, et ceci avec un très haut niveau d'intégrité des données,

[1] "*International Standard Organization / Open Systems Interconnection*"

3. le développement de nombreux composants (capteurs, effecteurs, contrôleurs, calculateurs...) compatibles CAN.

C'est pour toutes ces raisons que nous avons retenu cette solution lors du choix du mode de communication des différents organes.

Acquisition, commande et bus de terrain

Le choix d'une transmission numérique, via bus CAN, des signaux issus des capteurs et des signaux de commande du régulateur de vitesse implique, soit d'utiliser des capteurs/effecteurs intégrant le protocole CAN, soit de concevoir une interface adéquate. Dans cette optique, une conversion analogique/numérique des mesures ainsi qu'une conversion numérique/analogique des signaux de commande générés par NAICC et transmis au régulateur de vitesse sont nécessaires. Cela a conduit aux choix technologiques suivants :

- **micro-contrôleur C167** d'Infinéon : interface entre les capteurs/effecteurs et le système d'acquisition de données ("Autolab") implanté dans le coffre du véhicule, ce micro-contrôleur intègre de nombreuses fonctionnalités (convertisseurs 10 bits, sorties PWM, entrées numériques...), une interface CAN [INF01]. Il dispose également d'une puissance de calcul suffisante pour effectuer une part de traitement des données (filtrage, calcul déporté...). Ainsi, cette solution permet d'envisager la répartition, sur plusieurs cibles dédiées, des algorithmes développés (localisation par fusion de données, filtrage numérique...).
- système "**Autolab**" : une plate-fome de type P.C., intégrant différentes cartes d'acquisition (numérique, analogique, CAN et série) et fonctionnant sous environnement d'exploitation temps-réel QNX est utilisée. Celle-ci assure le stockage des données et l'exécution des modèles préalablement développés sous Matlab/Simulink. Cette station est en permanence connectée, via ethernet, à un P.C. industriel destiné à la visualisation des données mesurées et à la communication avec le modèle en cours d'exécution (cf. figure 6.7). Le principal avantage de cette structure réside dans l'intégration, par l'intermédiaire du logiciel RT-Lab de la société Opal-RT, d'un compilateur traduisant aisément un modèle défini sous Matlab/Simulink en langage de bas niveau exécutable sous QNX. Les modèles conçus *in situ* peuvent donc être rapidement portés sur le véhicule afin d'effectuer des tests en configuration réelle. Ce dispositif constitue par conséquent le cœur du projet puisqu'il intègre l'algorithme de localisation et la détermination des consignes de commande du régulateur de vitesse.

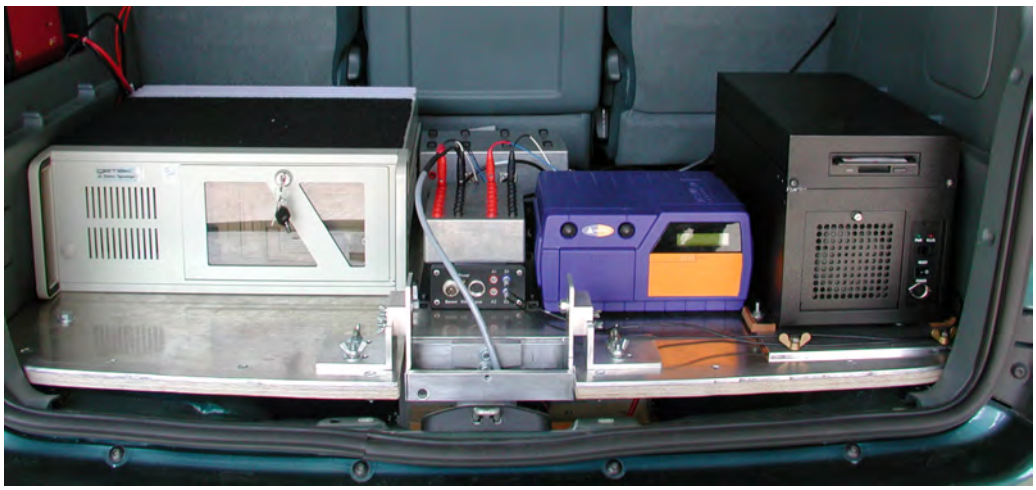


FIG. 6.7. : Système d'acquisition et de commande : "Autolab" et PC industriel

Sur la figure 6.7 on distingue, de gauche à droite :

1. le PC industriel servant au développement et à la visualisation des données,
2. le conditionneur du capteur de vitesses surmonté d'un boîtier de distribution du 12 V,
3. le récepteur DGPS,
4. la station d'acquisition et de commande "Autolab".

Synchronisation des données

La transmission de messages sur le bus CAN est caractérisée par une synchronisation évènementielle. Celle-ci consiste à définir un niveau de priorité fonction de la valeur de l'identificateur des messages [PAR96], le message de priorité maximale étant assuré de l'intégrité (ininterruption) de la transmission. Pourtant, avec la multiplicité des dispositifs électroniques, et notamment des organes de sécurité basés sur ce type de communication, il convient d'une part d'assurer une transmission déterministe afin de toujours garantir la disponibilité des messages relatifs à la sécurité, et ce quelque soit le trafic sur le bus. D'autre part, il est important d'utiliser dans les différents algorithmes (localisation, calcul du modèle interne), des données convenablement datée.

Le principe adopté consiste à synchroniser l'ensemble des évènements sur un message de référence transmis par l'"Autolab", considéré comme le nœud le plus important connecté sur le bus. Lors de la réception de ce message, les différentes centrales connectées au bus effectuent les acquisitions et retransmettent les résultats au maître. De même, l'application de la commande transmise au régulateur de vitesse se fait à réception du message de référence. Ce procédé détaillé dans [BON01a] et illustré sur la figure 6.8, se rapproche de la philosophie du *Time-Triggered CAN* de Robert Bosch GmbH, récemment présenté [FUE00].

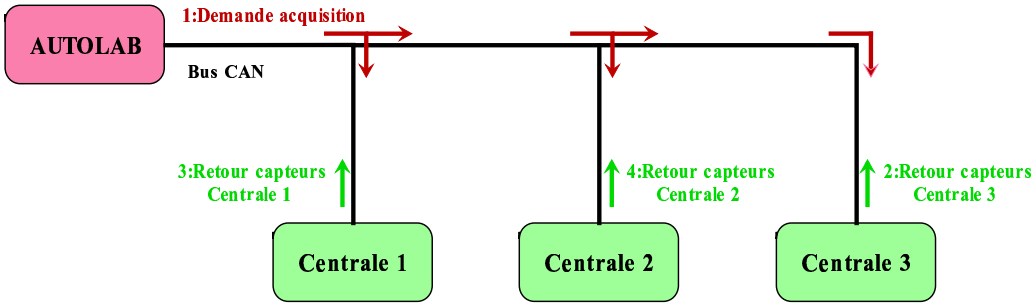


FIG. 6.8. : Principe de communication maître/escalve

Ainsi, l'horloge de l'"Autolab" est considérée comme la seule base temporelle de l'ensemble des dispositifs disponibles dans le véhicule[2].

Identification des sources d'émission

Le protocole relatif au bus CAN intègre un processus d'identification des messages. Plutôt que d'identification de messages, il conviendrait dans notre cas de parler d'identification d'émetteurs (dans le cas des capteurs) et de récepteurs (dans le cas des effecteurs). Il est en effet nécessaire, d'une part que le système d'acquisition puisse identifier l'origine des messages lui parvenant, et d'autre part qu'il s'adresse au bon effecteur lorsqu'il transmet une commande à appliquer. NAICC intègre une double identification au sein d'un même message [BON01a] : l'identificateur principal du message CAN correspond à la centrale d'où provient (ou à qui est destiné) le message. Un second identificateur relatif au capteur à la source de la mesure (ou à l'effecteur à qui est destinée la commande) est intégré dans la trame de données. Cette technique permet de minimiser la variété de messages sur le bus puisqu'une centrale se voit attribuée un seul message pour l'ensemble des composants la constituant.

6.3. Architecture logicielle d'acquisition et de commande

La diversité des équipements qui composent l'instrumentation, la volonté d'évolutivité et de flexibilité et finalement la disparité géographique des organes ont conduit à la conception d'une architecture logicielle assurant un fonctionnement et une collaboration robuste[3].

[2]Compte-tenu de la fréquence d'acquisition et de calcul peu élevée généralement employée (50Hz), de la vitesse de transmission des données sur le bus CAN (1Mbit/s), ou encore de la durée de conversion analogique/numérique du micro-contrôleur (quelques microsecondes), ce procédé assure une datation convenable pour notre application.

[3]Dans ce contexte, le terme "robuste" signifie que l'architecture doit permettre de mettre rapidement en évidence le mauvais fonctionnement d'un instrument de mesure ou du support de transmission. La sûreté de fonctionnement ne rentre pas dans le cadre de ces travaux.

6.3.1. Schéma d'exécution

D'une manière générale, un dispositif de commande est défini par des entrées (mesurées ou perturbatrices), des sorties, des actions de commande et des éléments de communication. Rapportée à l'instrumentation du véhicule NADINE, cette description se synthétise par la figure 6.9. Le processus de commande regroupe dans ce cas le système d'acquisition composé du PC industriel et de l'"Autolab". Le modèle d'exécution, déterminant les commandes en fonction des entrées mesurées, est défini par une description de haut-niveau, sous forme de schémas-blocs sous Matlab/Simunlink. Une structure logicielle en couche permet d'effectuer une séparation des tâches de visualisation (effectuée sur le PC) et des tâches d'acquisition et de commande (exécutées sur l'Autolab) (cf. §6.6.1.1 et §6.6.1.2).

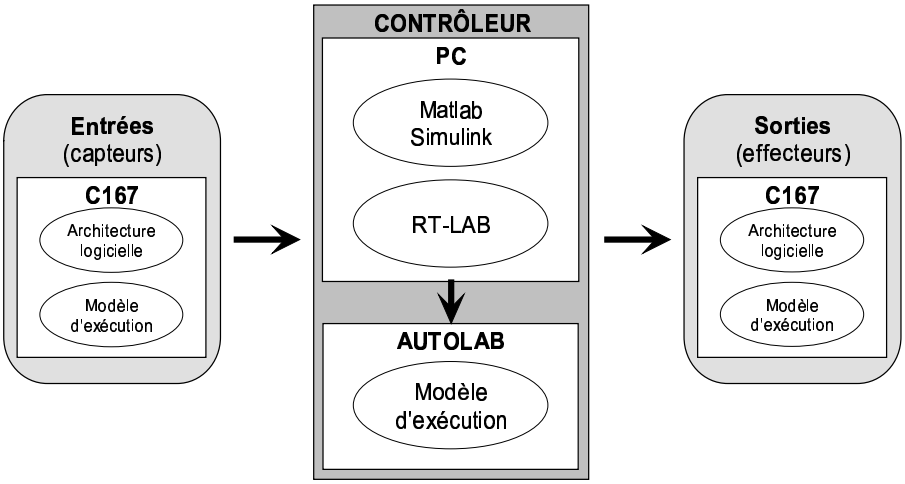


FIG. 6.9. : Architecture d'exécution

La structure relative aux entrées/sorties est, quant à elle, totalement différente puisque ces entités sont gérées par l'intermédiaire du micro-contrôleur C167. L'objectif de l'architecture logicielle implantée à ce niveau, en plus d'offrir des possibilités de réutilisabilité, réside donc dans **l'interconnection de systèmes hétérogènes tant au niveau de leur structure que de leur comportement**.

6.3.2. Systèmes et logiciels embarqués : l'approche orientée objet

Les contraintes de modularité et d'évolutivité décrites au paragraphe 6.2.1 ont orienté les développements logiciels vers l'utilisation et la mise en œuvre des techniques orientées objet. [BOO92] propose une description complète des concepts, des méthodes et des applications liées à la Programmation Orientée Objets (POO).

Même si le bien fondé de l'utilisation de ces techniques dans le cadre de la conception et du développement de systèmes embarqués tel que NAICC n'est plus à démontrer [ALU01, LEE01], rappelons que les notions de décomposition, d'abstraction et de hiérarchisation relatives à la POO permettent d'encapsuler la complexité naturellement liée à un système.

Pour illustrer les principes utilisés dans le développement de cette architecture, citons un exemple envisageable de modélisation de la centrale inertielle. Elle est composée de capteurs mesurant des grandeurs physiques de natures différentes (accélérations, vitesses de rotation, angle de braquage). D'un point de vue logiciel, la diversité et la composition se traduisent par des micro-architectures ("*Design patterns*"), véritables modèles de conception. [GAM95] présente en détail l'utilité de ces techniques de conception orientées objet.

L'exemple de la figure 6.10 présente sous forme UML ("*Unified Modeling Language*") [MUL97] une description possible de capteurs. L'entité de base (la classe *Capteur*) décrit uniquement le comportement générique du capteur, i.e. effectuer une mesure (par la méthode *Mesurer()*), sans préciser la manière dont cette dernière sera effectuée. Ce comportement est spécifié par héritage dans les classes "filles" concrétisant les diverses natures de capteurs utilisés : *Accéléromètre* et *Gyromètre.* Finalement, une *CentraleIntertielle*, regroupement de 1 à N *Capteur,* est obtenue par la micro-architecture "*Composite*".

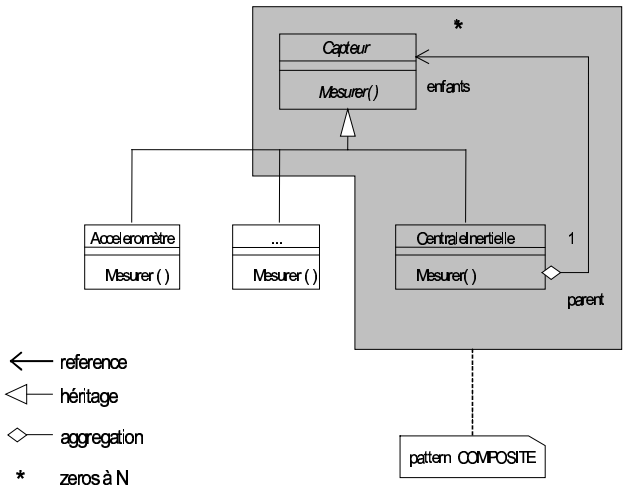


FIG. 6.10. : Diagramme de classes de la micro-architecture "*Composite*"

Dans ce cas de figure, les capteurs ont été décrits suivant la nature des informations qu'ils fournissent. Nous verrons dans le paragraphe suivant qu'ils peuvent également être décrits selon le procédé de mesure employé (analogique, numérique...).

La généralisation de cette modélisation à l'ensemble des composants d'entrées/sorties de NAICC mène à l'architecture globale décrite ci-dessous.

6.3.3. Architecture globale d'acquisition et de commande

La figure 6.11 illustre l'architecture logicielle relative à la gestion des entrées/sorties. Elle constitue les bases d'un "framework" dédié à l'acquisition et à la commande de NAICC. Cette approche permet de laisser toute latitude au concepteur pour enrichir ou spécialiser les comportements des éléments de base. Un ajout, une modification ou une suppression d'un élément physique du système peuvent aisément être envisagés.

Trois composantes majeures peuvent être distinguées sur ce diagramme :

– l'architecture d'acquisition (*Sensor*),

– l'architecture de commande (*Effector*),

– l'architecture de communication (*Can* et *CanReceiver*).

Acquisition et commande

Les architectures d'acquisition et de commande sont symétriques car toutes deux basées sur les principes de conception présentés au paragraphe 6.3.2. Ainsi, comme pour les capteurs, la classe de base *Effector* définit les comportements génériques. Ces comportements sont concrétisés lors de la spécification des effecteurs utilisés : le régulateur de vitesse est decrit par la classe *CCEffector* ("cruise control effector") dont les comportements principaux sont *ReadCommand()* (lecture de la consigne transmise par l'"Autolab") et *ApplyCommand()* (envoi de la commande à l'actionneur de l'angle papillon). La composition d'effecteurs est possible via la classe *EffectorUnit*. Celle-ci permet par exemple de décrire des systèmes comme le "steer by wire" (commande électrique du braquage des roues composé de plusieurs effecteurs) [AZZ02].

Les accéléromètres et les gyromètres étant tous des capteurs connectés aux entrées analogiques du microcontrôleur, nous avons choisi de spécifier l'ensemble des composants d'entrée selon le procédé de mesure. Ainsi, les classes de capteurs possibles seront par exemple *Digital*, *Adc* (convertisseur analogique) ou *Adc12b* (convertisseur analogique 12 bits).

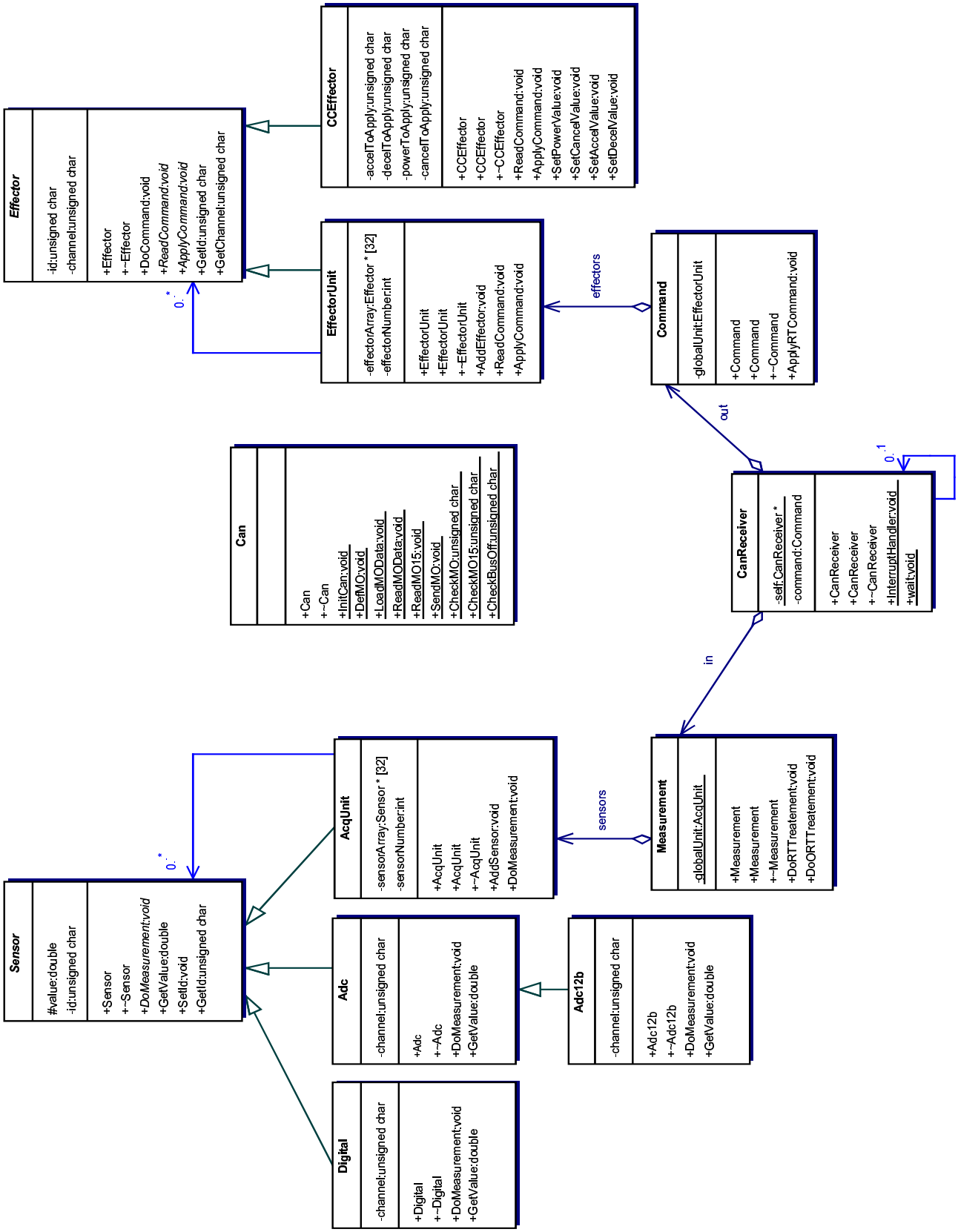


FIG. 6.11. : Architecture de gestion des entrées/sorties - Diagramme de classes

Communication

L'architecture de communication est la concrétisation de l'interface entre l'"Autolab" et les procédés d'acquisition et de commande. Les classes *Can* et *CanReceiver* décrivent l'ensemble des comportements nécessaires à la gestion de la communication via le bus CAN.

Les classes *Measurement* et *Command* permettent respectivement à l'ensemble des capteurs et effecteurs d'accéder au bus CAN via la même classe *CanReceiver*.

6.3.4. Application à l'acquisition et à la commande embarquées

Le cas d'utilisation ci-après décrit un exemple d'implémentation de l'architecture développée précédemment. Il permet d'effectuer de manière simple l'intégralité des traitements (mesures et commandes) relatifs à une centrale inertielle et un effecteur de type régulateur de vitesse. Il détaille tout d'abord la manière dont sont définis 2 gyromètres, 3 accéléromètres et finalement un effecteur pour la régulation de la vitesse. Les capteurs sont regroupés dans une centrale dénommée *acquisitionUnit* et l'effecteur *myCC* fait partie de la centrale *commandUnit* (ne comportant dans cet exemple qu'un seul effecteur). Une mesure sur l'ensemble des capteurs s'effectue à l'aide de la méthode *m.DoMeasurment()* où "*m*" est une instance de la classe *Measurement*. Celle-ci fait alors appel aux méthodes de mesure propres à chaque capteur. Lorsque les mesures sont effectuées, elles sont transmises à l'"Autolab" par l'intermédiaire de l'instance de la classe *CanReceiver*. De même, l'exécution d'une commande provenant de l'"Autolab" par l'intermédiaire de la même instance s'opère par la méthode *c.ApplyCommand()*, où "*c*" est une instance de la classe *Command*.

Algorithme 1 Cas d'utilisation de l'architecture

```
int main()
{
   ADC12b psi_p(1, 0);                    //création des gyromètres (ID et canal de l'ADC)
   ADC12b teta_p(2, 1);

   ADC12b gamma_l(3, 2);                  //création des accéléromètres (ID et canal de l'ADC)
   ADC12b gamma_t(4, 3);
   ADC12b gamma_z(5, 4);

   AcqUnit acquisitionUnit(1);            //création d'un composite de capteurs
   acquisitionUnit.AddSensor(&psi_p);
...
   CCEffector myCC(1, 1);                 //création d'un effecteur cruise control
   EffectorUnit commandUnit(1);           //création d'un composite d'effecteurs
   commandUnit.AddEffector(&myCC);

   Measurement m(acquisitionUnit)
   Command c (commandUnit);
   CanReceiver myCanR(m, c);

   while (true)
   {
      ...
      m.DoMeasurement();                  //mesure sur l'ensemble des capteurs
      c.ApplyCommand();                   //application des commandes envoyées par l'autolab
   }
}
```

Si d'un point de vue matériel, les composants de la plateforme expérimentale sont très hétérogènes, l'approche OO pour l'interface entre les capteurs/effecteurs et le système d'acquisition est une des clés de l'ouverture de l'ensemble. Elle garantit en effet la possibilité d'ajouter aisément de nouveaux composants ou simplement des fonctionnalités aux composants déjà en place.

Dans le contexte de NAICC, et plus largement dans celui de systèmes ou processus automatisés, l'architecture logicielle proposée pourrait avantageusement être étendue en utilisant des patterns de conception spécifiques à la commande de processus comme ceux proposés par [GAE99].

Finalement, la plateforme expérimentale présentée dans cette section a été utilisée pour l'obtention des résultats illustrés dans la suite de ce chapitre.

6.4. Validation de la fusion multisensorielle

Ce paragraphe s'intéresse aux résultats relatifs au module de localisation de NAICC. Dans un premier temps, des résultats de l'estimation des données du gyromètre sont illustrés. Dans un deuxième temps, ceux-ci sont utilisés lors de la fusion multisensorielle par EKF. Pour rappel, le filtre de Kalman étendu se base sur les mesures de vitesses longitudinale et latérale et sur l'estimation de la vitesse de lacet, lors de la phase de prédiction. La correction s'effectue à partir des observations issues du DGPS. La position ainsi déterminée est utilisée par le module de corrélation cartographique dont l'objectif est de localiser le véhicule dans la base de données. Ce dernier s'appuie sur le procédé de modélisation par courbes de Bézier décrit au paragraphe 6.4.3.

Pour fournir les résultats expérimentaux présentés ci-après, les caractéristiques statistiques relatives à chaque capteur et figurant dans la table 6.1 ont été utilisées.

Terme	Valeur
$\sigma^2_{\dot{\psi}}$	$5 \cdot 10^{-7} rad^2 s^{-2}$
$\sigma^2_{\ddot{\psi}}$	$6 \cdot 10^{-7} rad^2 s^{-4}$
σ^2_{ff}	$10^{-10} rad^2 s^{-2}$
σ^2_{gyro}	$8 \cdot 10^{-7} rad^2 s^{-2}$
σ^2_{gps}	$2,25 \cdot 10^{-4} m^2$
$\sigma^2_{V_L}$	$8 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-2}$
$\sigma^2_{V_T}$	$8 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-2}$

TAB. 6.1.: Variances des bruits du modèle

6.4.1. Estimation de la vitesse de lacet et de l'angle de lacet

Les graphes 6.12 et 6.13 présentent les résultats du filtrage de Kalman appliqué au gyromètre mesurant la vitesse de lacet du véhicule. Ces premiers essais ont été menés véhicule à l'arrêt durant 220 secondes.

De l'acquisition illustrée par la figure 6.12a, on constate principalement un biais sur la mesure, en moyenne de -0.009 rad/s. Dès lors, en intégrant simplement ce signal, l'on obtient une rampe dont le coefficient directeur correspond logiquement à l'offset de mesure (cf. figure 6.12b).

La figure 6.12b présente l'estimation de l'angle de lacet (en pointillés). Ces résultats correspondent avec la manipulation puisque, le capteur étant maintenu immobile durant l'essai, l'angle doit être voisin de zéro. Comparé à la courbe obtenue par l'intégration de la vitesse de lacet (en trait continu sur cette même figure), cette solution évite une dérive de l'angle de lacet de près de 2 radians (115°) au bout des 220 secondes d'expérimentation. L'intérêt à ce niveau est que lors d'essais, la traditionnelle phase de calibration des capteurs servant à quantifier les offsets sur les mesures peut être omise. La correction est effectuée en temps-réel par l'intermédiaire du filtre.

En observant la figure 6.13a relative à l'état x_{ff} du filtre formeur, on constate que celui-ci a absorbé le biais de mesure du gyromètre et que sa valeur demeure constante et égale à -0.009 rad/s durant l'ensemble de l'expérience.

Finalement, un indicateur de performance du fonctionnement du filtre est représenté par la séquence d'innovation illustrée sur le graphe 6.13b. Celle-ci est non-biaisée et centrée sur zéro comme le stipule la condition d'optimalité du filtre. Ainsi, cette structure est un procédé efficace d'estimation des données gyromètriques lorsque le capteur se trouve en régime établi.

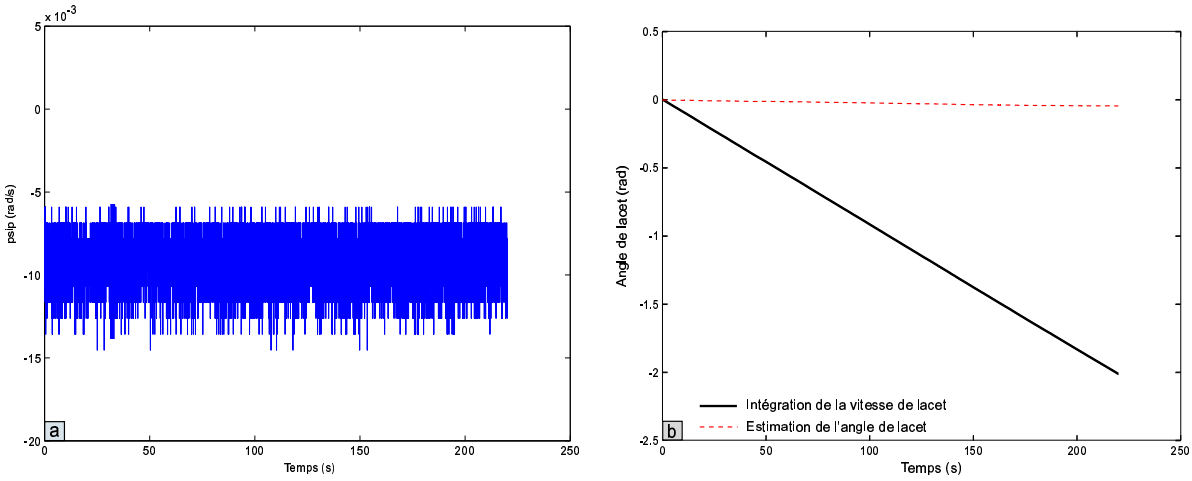


FIG. 6.12. : Signal de sortie du gyromètre (a), intégrale du signal et angle de lacet estimé (b)

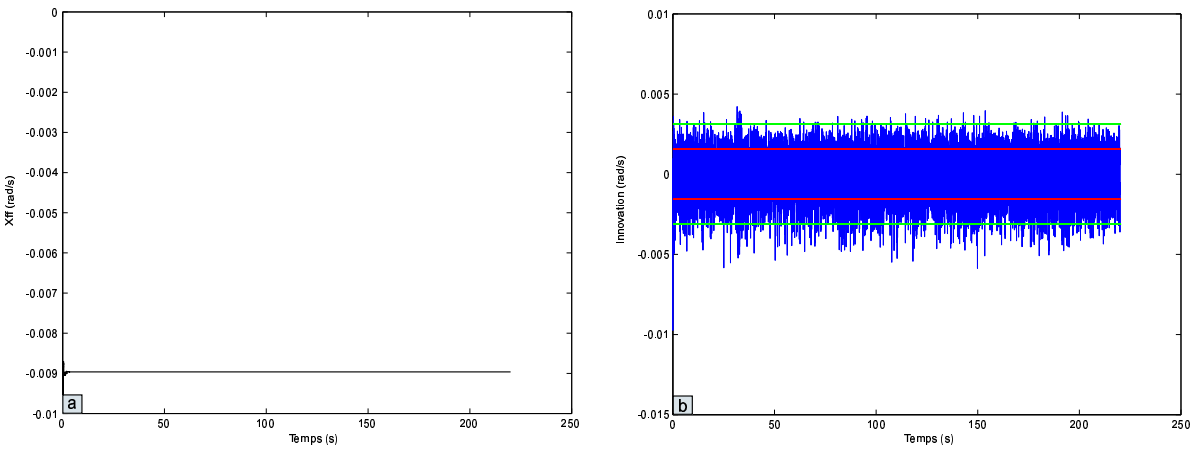


FIG. 6.13. : Estimation du filtre formeur (a) et séquence d'innovation du filtre de Kalman (b)

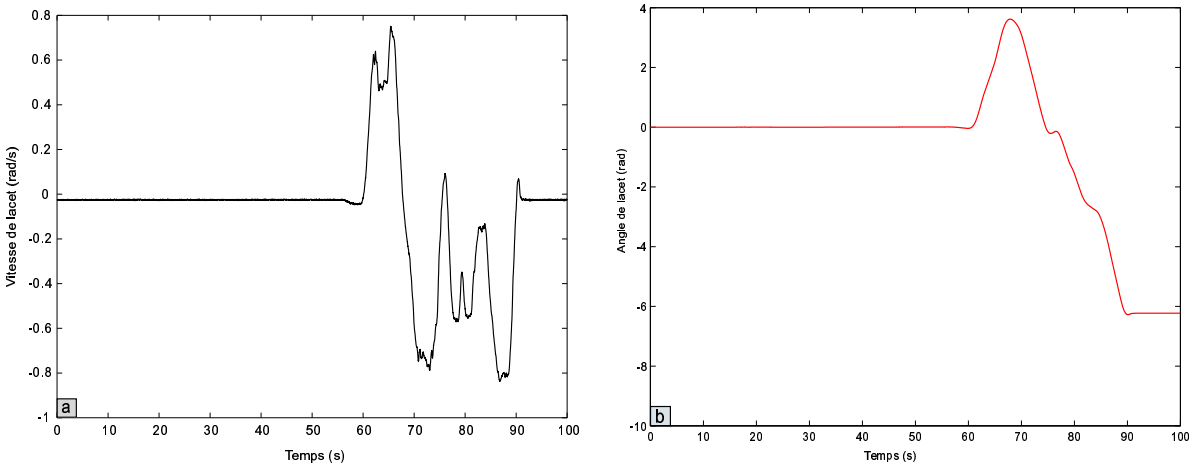


FIG. 6.14. : Vitesse de lacet mesurée (a) et estimation de l'angle de lacet (b)

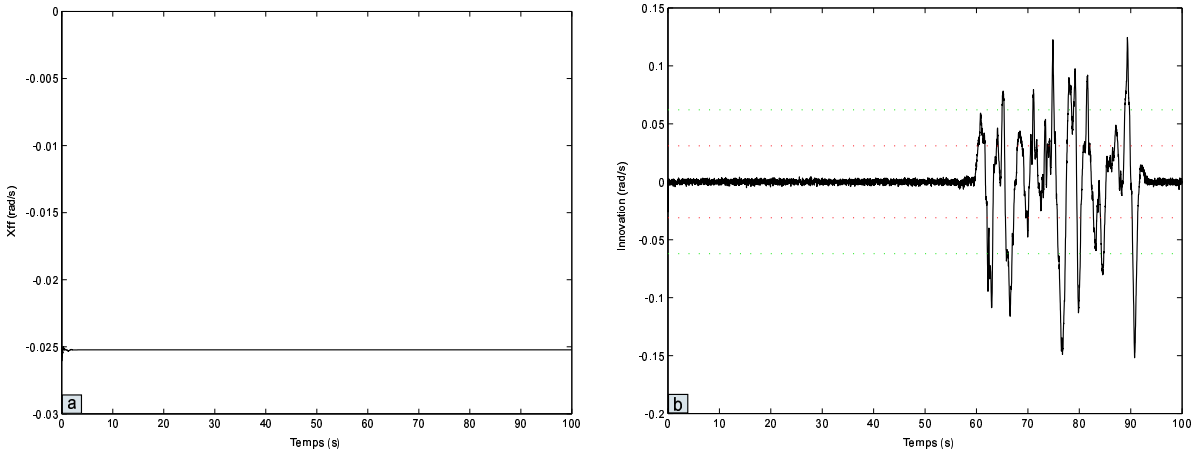


FIG. 6.15. : Estimation du filtre formeur (a) et séquence d'innovation du filtre de Kalman (b)

Les figures 6.14 et 6.15 montrent les capacités et limitations du modèle "à accélération constante" lorsque le capteur est soumis à des variations de vitesse de rotation. Les essais de validation consistaient à effectuer le parcours illustré sur la figure 6.17b et à relever l'ensemble des signaux nécessaires à la fusion multisensorielle. La référence fixe servant au calcul des corrections DGPS a été placée sur le toit de notre école afin d'assurer une disponibilité maximale des signaux de corrections. La trajectoire obtenue par le système DGPS en coordonnées cartésiennes exprimées dans le référentiel absolu a été ramenée dans un repère local, centré sur le point de départ du véhicule (cf. figure 6.17b).

Durant ces tests, un offset (de l'orde de - 0.025 rad/s) a été constaté sur les mesures du gyromètre (cf. figure 6.14a). Comme nous pouvons le constater sur les figures relatives au filtre formeur (figure 6.15a) et à l'estimation de l'angle de lacet (figure 6.14b), cet offset est filtré. L'angle de lacet demeure en effet égal à zéro durant les 60 premières secondes qui correspondent à la période d'immobilité du véhicule et de parcours de la ligne droite.

L'analyse de la séquence d'innovation (figure 6.15b) du filtre de Kalman fait apparaître deux points :

- en régime établi ($t \leq 60\,s$), les performances du filtre sont correctes (l'innovation étant blanche et centrée sur zéro),
- dès les premières sollicitations du véhicule (correspondant à des prises de virages), le modèle à "accélération constante" montre ses limites puisque la séquence d'innovation n'est plus blanche, ce qui signifie que l'estimation n'est pas optimale.

Pour conclure, on remarquera que le filtre formeur, dans la configuration actuelle, n'identifie que la dérive du gyromètre, et cela dans une configuration stationnaire[4]. Cette structure non optimale, en regard à la séquence d'innovation, a néanmoins été adoptée du fait des résultats obtenus par le module de positionnement global. Ces derniers sont en effet satisfaisants pour notre application.

6.4.2. L'EKF pour la fusion DGPS-mesures extéroceptives

La figure 6.16a présente l'angle de lacet résultant de l'intégration de la mesure du gyromètre (trait plein) ainsi que l'angle de lacet estimé par le filtre de Kalman associé (pointillés). La figure 6.16b illustre les trajectoires correspondantes. Celles-ci ont été obtenues par l'utilisation du procédé dit de "*Dead-Reckoning*" (DR) [CHA96] consistant en un calcul récursif de la trajectoire par intégrations successives des données des capteurs proprioceptifs. Cette technique nécessite une phase d'initialisation définissant la position et le cap de départ. Cette illustration présente l'intérêt de l'estimation de l'angle de lacet, puisqu'elle permet de se découpler de la

[4]Une solution pourrait consister à substituer au filtre formeur basé sur un mouvement Brownien, un modèle du bruit de mesure plus élaboré, déduit de l'étude de la densité spectrale de puissance du signal.

dérive de ce signal et d'obtenir une trajectoire dont l'allure (mais pas l'orientation) est proche de la trajectoire de référence fournie par le DGPS (cf. figure 6.17b).

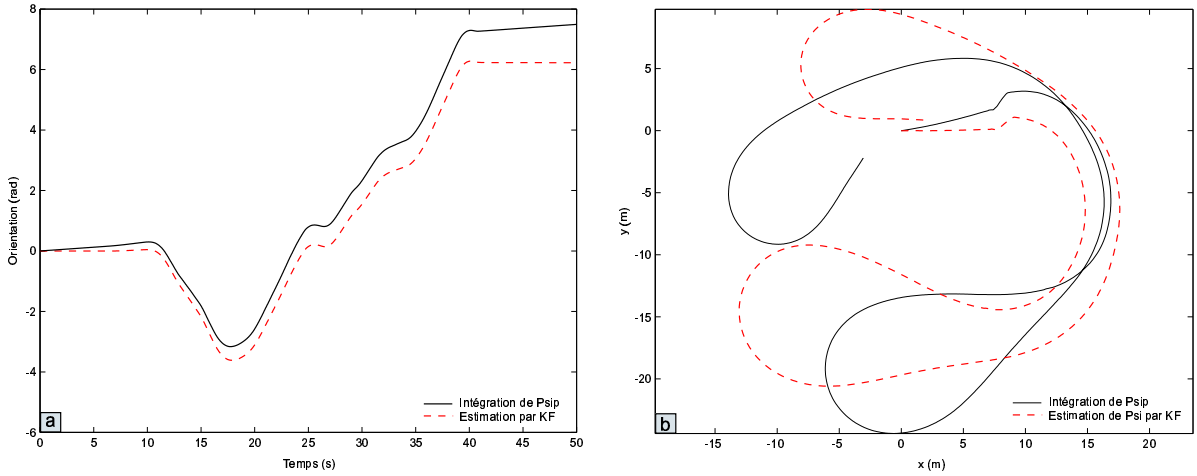


FIG. 6.16. : Avant et après estimation de l'angle de lacet par filtrage de Kalman

Le fait de ne pas utiliser $\widehat{\psi}$, déterminé par le filtre de Kalman associé, pour calculer directement la position du véhicule (x_k, y_k) (relation (5.30)) permet d'accroitre la précision du positionnement. En effet, c'est à partir de la vitesse de lacet estimée $\widehat{\dot{\psi}}$ que l'EKF determine une nouvelle valeur du cap. L'intérêt de cette méthode réside dans le fait que ce cap est alors ajusté par l'EKF en fonction des observations issues du DGPS. Ceci mène à une trajectoire dont l'orientation finale est dépourvue de dérive du fait du premier filtrage, et correspond à l'orientation absolue relevée par le DGPS grâce aux corrections effectuées par l'EKF. C'est pourquoi, sur la figure 6.17a représentant l'orientation finale, on note un palier en $t = 5\,s$ où le filtre ajuste le cap au cap réel relevé par le DGPS dans le référentiel absolu. Par ailleurs, cette technique permet également de prendre en compte les dérives du capteur en régime non stationnaire.

La trajectoire fusionnée est représentée par des points sur la figure 6.17b alors que le relevé DGPS correspond au tracé en ligne continue. Dans cette expérimentation un perte DGPS complète (plus aucune information ni de la référence ni du mobile embarqué) d'une durée d'environ 25 secondes a été simulée. Ainsi à partir du point marqué sur la figure 6.17b et jusqu'à la fin du parcours, l'algorithme de fusion n'exécute plus que la phase de prédiction basée sur le modèle d'évolution. Néanmoins, les résultats restent satisfaisants comme l'illustre cette figure.

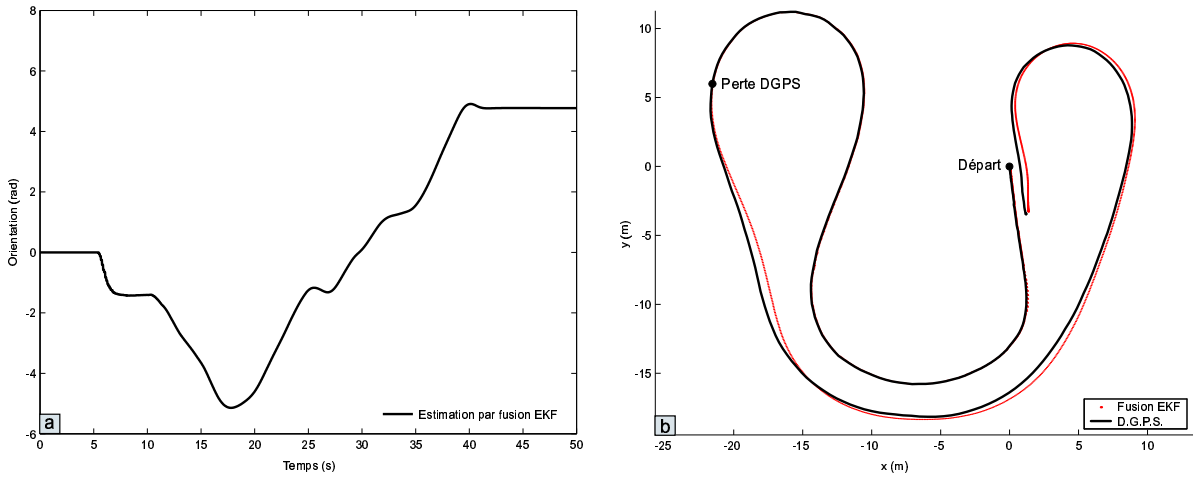


FIG. 6.17. : Fusion des informations par EKF

La figure 6.18 présente les erreurs[5] d'estimation sur les états x (figure 6.18a) et y (figure 6.18b), ainsi que les intervalles de confiance respectifs. Ces "enveloppes" ont été obtenues à partir des diagonales de la matrice de covariance $P(k \mid k-1)$ de l'EKF et représentent les limites à +/- 2 écarts types. On relève immédiatement que, durant la disponibilité des données DGPS, l'erreur de positionnement commise par rapport à la trajectoire DGPS ainsi que l'intervalle de confiance demeurent sensiblement constants. Un recalage de la trajectoire prédite grâce aux observations du DGPS à une fréquence de 10Hz est à la source de ce résultat. Dès la perte du DGPS, $(t = 25\,s)$, l'intervalle de confiance augmente considérablement. Il convient cependant de noter, que l'augmentation quasi-linéaire de l'erreur sur x à partir de $t = 45\,s$ est liée non pas à une divergence du filtre de Kalman, mais simplement à des mesures erronées transmises par le DGPS en fin de parcours[6]. Néanmoins, l'erreur de positionnement constatée reste convenable ($\leq \pm 0.5\,m$).

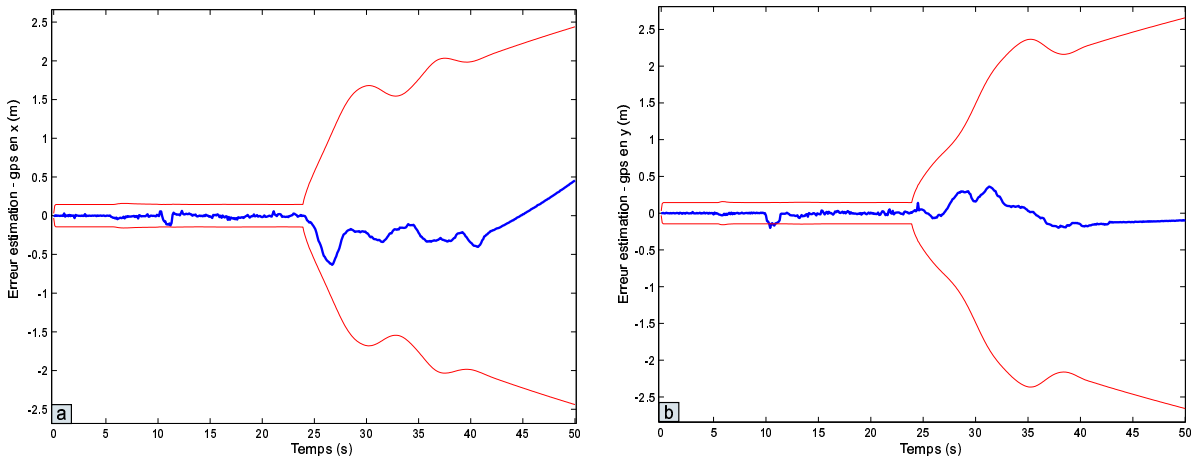


FIG. 6.18. : Erreurs d'estimation en x et y

Conclusion

Au vu de ces différents résultats, nous pouvons conclure que cette solution présente une structure simple, de précision convenable pour effectuer un asservissement du véhicule assisté par un dispositif de localisation. Dans des conditions d'absence totale d'observations du DGPS pendant une durée déjà conséquente (près de 30 s), l'erreur de localisation ne dépasse à aucun moment 50 cm. Pendant ce masquage, le véhicule a parcouru près de 90 mètres dans une succession de virages et de lignes droites durant lesquels ni l'erreur longitudinale ni l'erreur latérale n'ont augmenté de manière significative. Bien entendu, il convient de rapporter ces résultats au fait que les vitesses longitudinale et latérale sont relevées à l'aide d'un capteur de vitesses qu'il n'est pas envisageable de conserver dans la perspective de cette application. L'utilisation de mesures ou estimations moins précises de ces grandeurs risque probablement de dégrader ces résultats. Elle réduira en tout cas certainement la durée pendant laquelle il sera envisageable d'estimer convenablement la position sans DGPS.

Par ailleurs, dans le cas de figure présenté, la perte de données du DGPS a été simulée. Lors d'expérimentations en extérieur, le système DGPS nécessite une période de ré-initialisation d'environ 20 à 30 secondes après un masquage prolongé avant d'atteindre à nouveau la précision maximale. Durant cette période, le positionnement n'est assuré que par les mesures proprioceptives ce qui peut à long terme être une source importante d'erreurs.

Pour palier à ce type de phénomènes et éviter une dérive inacceptable de l'estimation de la position, une solution consiste à s'appuyer sur la cartographie routière. Lors de l'étape de localisation par recherche dans la base de données, il est envisageable de réactualiser le vecteur d'état de l'EKF par la position identifiée sur le profil routier. **La cartographie peut alors être considérée comme un capteur supplémentaire lors de**

[5] L'erreur correspond à la différence entre le dernier point prédit $\mathrm{x}(k+1 \mid k)$ par le modèle d'évolution et la nouvelle observation disponible $z(k)$.

[6] le véhicule se trouve alors à nouveau à l'arrêt alors que les données DGPS divergent progressivement du fait d'un nombre insuffisant de satellites visibles. Lors de cet essai, le masquage satellitaires a majoritairement influencé les mesures sur les abscisses : le système DGPS donnait en fin de parcours l'impression d'un déplacement purement latéral du véhicule...

la fusion multisensorielle. On pourrait par exemple effectuer une mise à jour du vecteur d'état à partir de la corrélation cartographique :

- à intervalle de temps défini,
- en fonction de la complexité du parcours,
- en fonction de la qualité des signaux DGPS,
- en fonction de l'erreur commise sur le positionnement (matrice de covariance du filtre)...

6.4.3. Modélisation du profil routier

La validité de la modélisation par courbes de Bézier est évaluée de manière qualitative, par rapport au relevé DGPS centimétrique initial. Les premiers résultats présentés ici concernent l'algorithme de découpage du fichier DGPS permettant de définir les portions de routes qui feront l'objet d'une modélisation par courbes de Bézier (figure 6.19). La deuxième partie de la validation présente une section du même circuit reconstruite à l'aide des courbes de Bézier issues de l'identification par algorithmes génétiques (figure 6.20).

6.4.3.1. Découpe du profil routier

L'exemple de la figure 6.19 résulte du traitement d'un fichier de description du site du GIAT à Satory[7]. Ce fichier est issu d'un relevé effectué avec un DGPS centimétrique et caractérisé par une très bonne précision de représentation : suivant l'évolution de l'abscisse curviligne, un point est défini tous les 10 cm[8].

Le premier travail de recherche des sections curvilignes aboutit à un découpage du tracé en 35 sections (cf. figure 6.19). Les points qui seront stockés dans la base de données finale seront les points A, B, M et N de chaque polygône de contrôle décrivant les courbes de Bézier (cf. §5.6.2.1) de chacun des 35 tronçons.

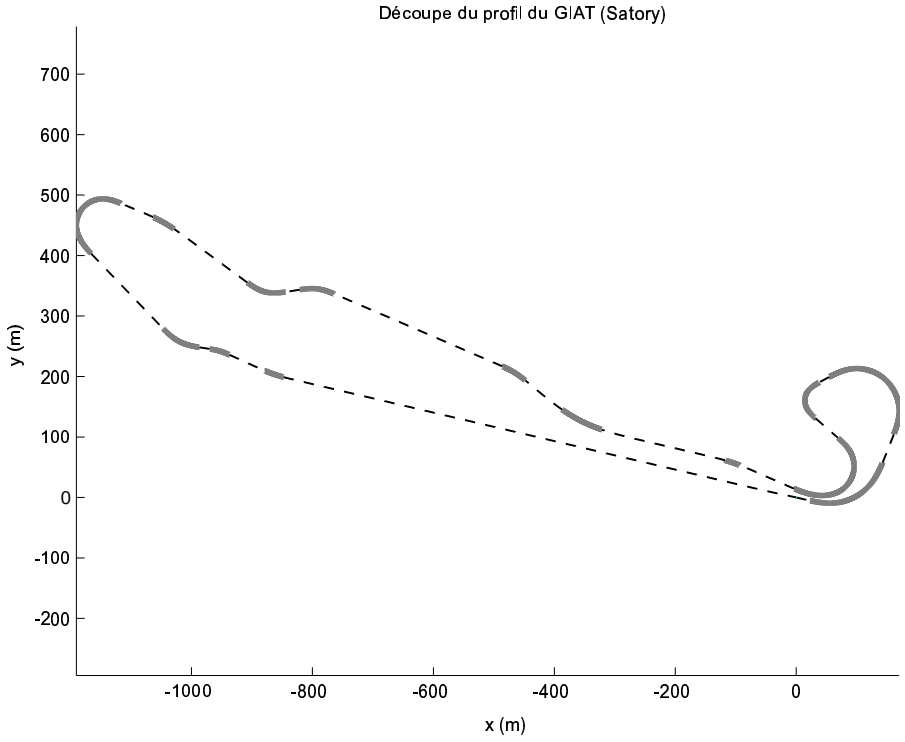


FIG. 6.19. : Détermination des sections curvilignes d'un tracé DGPS

[7]Cette modélisation a été effectuée dans le cadre d'une démonstration des travaux de l'équipe MIAM durant la conférence IV2002.
[8]Ceci se traduit par ailleurs par l'utilisation d'un fichier contenant près de 68000 points.

6.4.3.2. Modélisation par courbes de Bézier

Les points d'ancrage sont implicitement définis comme étant le début et la fin de chaque segment identifié ci-dessus. Le placement optimal des points de contrôle est défini par l'intermédiare des algorithmes génétiques (AG). Le tableau 6.2 présente les points *A, B, M* et *N* obtenus par les AG pour construire une partie du circuit (figure 6.20). Ainsi, en temps-réel et en fonction du pas configuré pour la raison, le système reconstruit le profil d'évolution de la piste. Finalement, on dénombre au total 140 points[9] de description pour reconstruire, à l'aide de courbes de Bézier, le profil complet du circuit.

A		***B***		***M***		***N***	
x_A	y_A	x_B	y_B	x_M	y_M	x_N	y_N
0.0	0.0	31.04	-6.88	10.43	-2.54	20.7	-6.9
31.04	-6.88	106.7	6.75	57.2	-12.08	84.96	-9.9
106.7	6.75	166	117.6	133.04	23.98	153.54	78.6
166	117.6	70.25	206.8	188.48	185.96	122.93	229.8
70.25	206.8	32.15	186.9	58.78	202.13	34.22	188.24
32.15	186.9	26.73	135.7	7.7	171.09	10.85	150.72
26.73	135.7	82.85	84.83	46	115.93	65.82	104.35
82.85	84.83	82.17	18.4	100.49	65.32	99.93	36.58
82.17	18.4	13.47	8.19	65.78	0.31	35.70	0.9
13.47	8.19	-97.11	54.7	-26.2	19.61	-33.3	31.54

TAB. 6.2.: Points de Bézier utilisés pour construire le profil de la figure 6.20

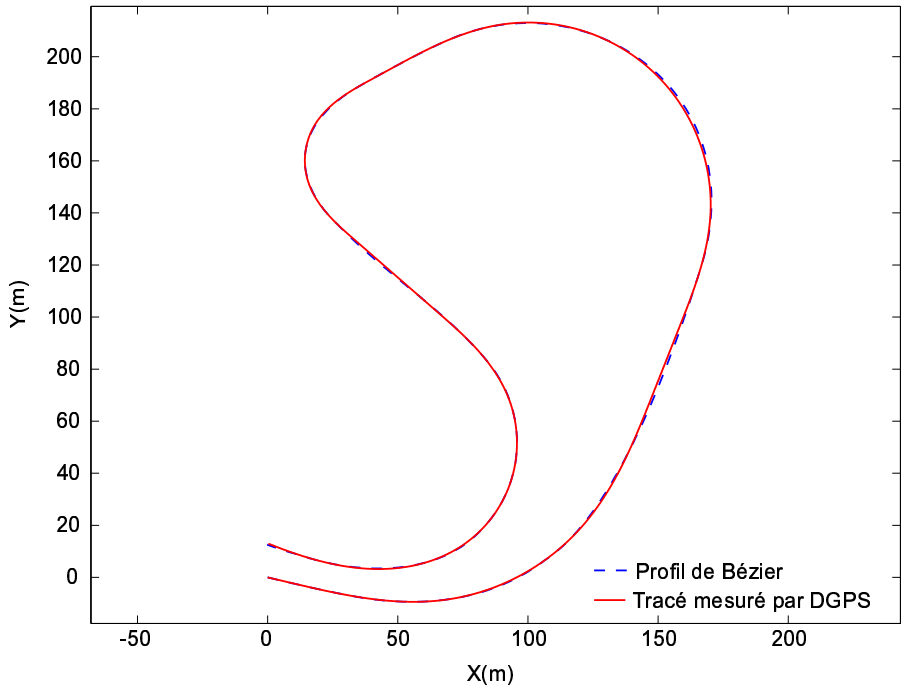


FIG. 6.20. : Représentation d'une portion de la piste du GIAT par des courbes de Bézier

[9]Le point *B* d'une section et le point *A* de la section suivante étant confondu, il serait possible de réduire davantage la quantité de données à stocker.

6.5. Génération de trajectoires pour la commande latérale

Cette section concerne la modélisation de trajectoires par splines polaires. L'étude trajectographique (chapitre 3) menée sur deux classes de conducteurs a permis de conclure sur les structures des modèles à employer. Par ailleurs, les paramètres des modèles ont été identifiés en fonction du profil routier. Les deux phases ci-après consistent à :

- illustrer la validité de la modélisation de trajectoire pour chaque classe de conducteur,
- présenter les résultats du générateur automatique de trajectoires couplant les splines polaires et les polynômes cartésiens (G-SCP) pour représenter la trajectoire dans un profil complexe.

6.5.1. Modélisation de trajectoires

6.5.1.1. Conducteur "inexpérimenté"

Sur la figure 6.21b a été reproduite la trajectoire enregistrée lors d'un passage dans le virage 14 de la piste de Biltzheim. Le rayon de la trajectoire (figure 6.21a) a été déterminé dans le repère lié au profil routier, et dont le centre est représenté par une croix sur la figure 6.21b. La détermination du seul "point objectif" (point de corde) de cette trajectoire et des points de jonction, basée sur les méthodologies exposées dans le chapitre 3 mène au modèle polaire présenté sur cette même illustration. Le modèle de trajectoire ainsi généré est fidèle aux données mesurées et représente de manière convenable la classe des conducteurs "inexpérimentés".

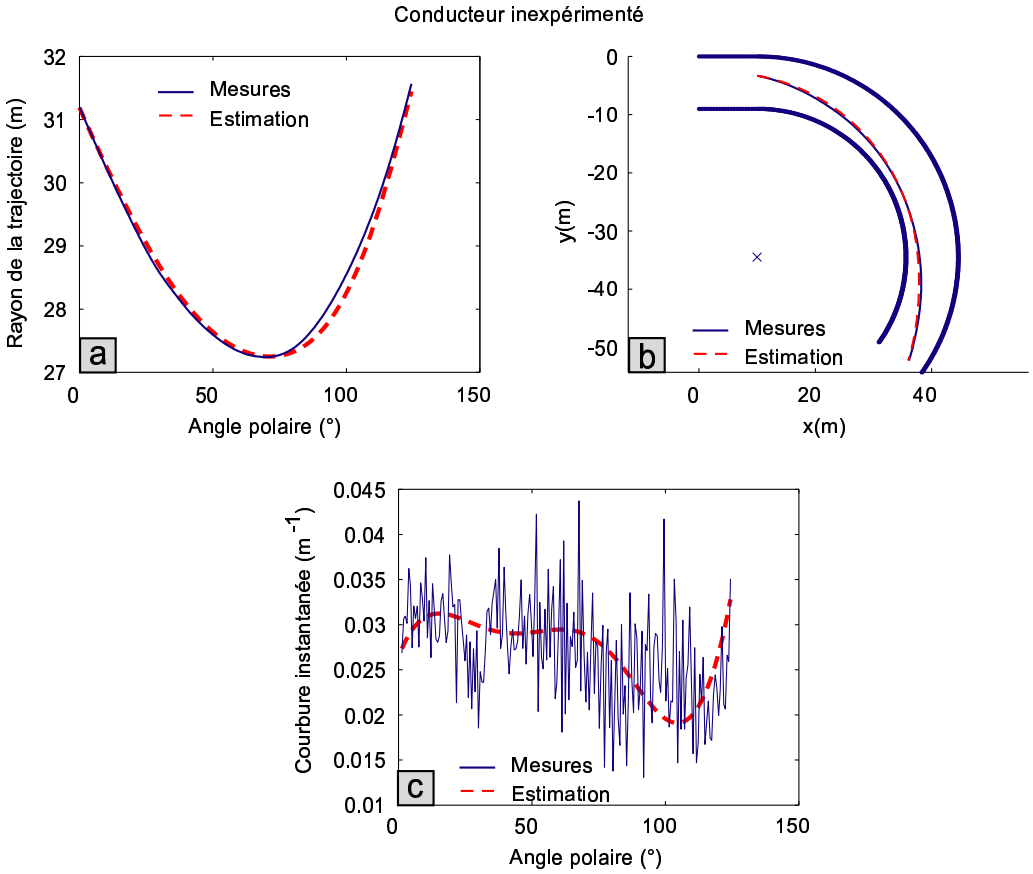


FIG. 6.21. : Modélisation de trajectoire et sollicitations associées

On peut noter la validité des choix effectués (structure du modèle, sélection des contraintes, identification des paramètres...) tant dans la définition des positions, des pentes et de la courbure (figure 6.21c) en ces différents points, ainsi que tout au long du trajet. Même si, aux alentours de ϕ =100°, on dénote une légère divergence

dans l'estimation du rayon et donc dans celle de la courbure, les résultats finaux (la trajectoire en courbe) demeurent conformes.

6.5.1.2. Conducteur "très expérimenté"

L'application des méthodes développées au profil de conducteur "très expérimenté", dans la même situation de conduite, mène aux résultats illustrés par les figures 6.22a à 6.22c.

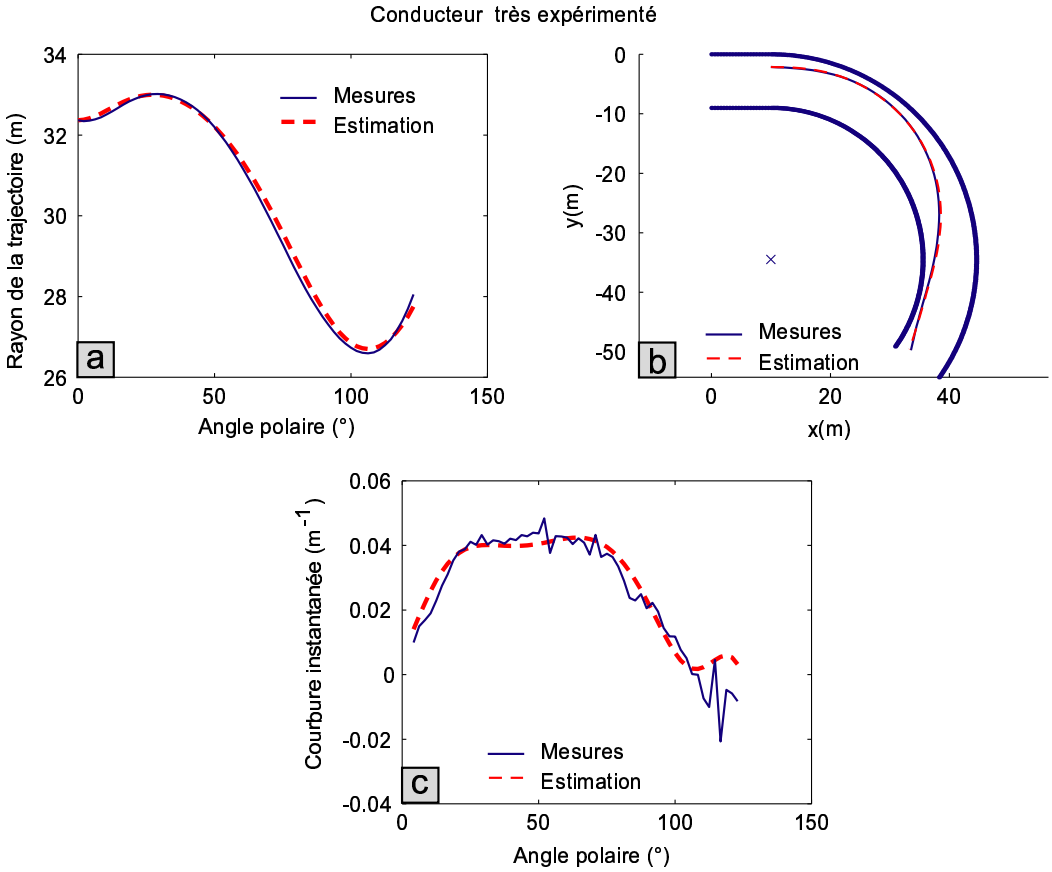


FIG. 6.22. : Modélisation de trajectoire et sollicitations associées

Des remarques analogues à celles formulées dans le paragraphe précédent peuvent être effectuées : la modélisation du rayon de la trajectoire et la courbure en résultant sont satisfaisantes.

6.5.2. Génération automatique de trajectoires

En couplant le principe de génération de trajets par splines polaires aux SCP-généralisés (cf. chapitre 3), nous sommes en mesure de définir un trajet géométrique pour une succession de lignes droites et de virages. L'algorithme développé se focalise dans un premier temps sur l'élaboration des trajectoires en virage puis, une fois que l'ensemble des splines polaires ont été définis, calcule les phases de transition V-LD-V.

Dans les exemples de la figure 6.23, nous fournissons au générateur un profil routier dans lequel le chemin doit être généré. Le type de conducteur, choisi parmi les deux catégories étudiées, est également spécifié. A partir de ces informations, le module exécute dans l'ordre, les étapes suivantes :

1. Détermination de l'ensemble des trajectoires en virage par :
   a) calcul des indicateurs comportementaux de la catégorie de conducteurs considérée,
   b) calcul des "points objectifs" (point de plongée et de corde),

c) sélection floue des points de jonction en fonction des points de corde,

d) calcul des modèles dans le repère polaire et conversion vers un référentiel cartésien.

2. Détermination des jonctions V-LD-V par :

a) calcul des pentes et courbures dans les repères liés aux transitions,

b) calcul, dans le repère local, des G-SCP assurant la transition entre deux splines polaires,

3. Conversion des résultats dans le repère cartésien global dont l'origine est confondue avec le lieu de départ du véhicule.

Un exemple de génération de trajectoires pour des conducteurs "inexpérimentés" et "très expérimentés" est présenté sur la figure 6.23.

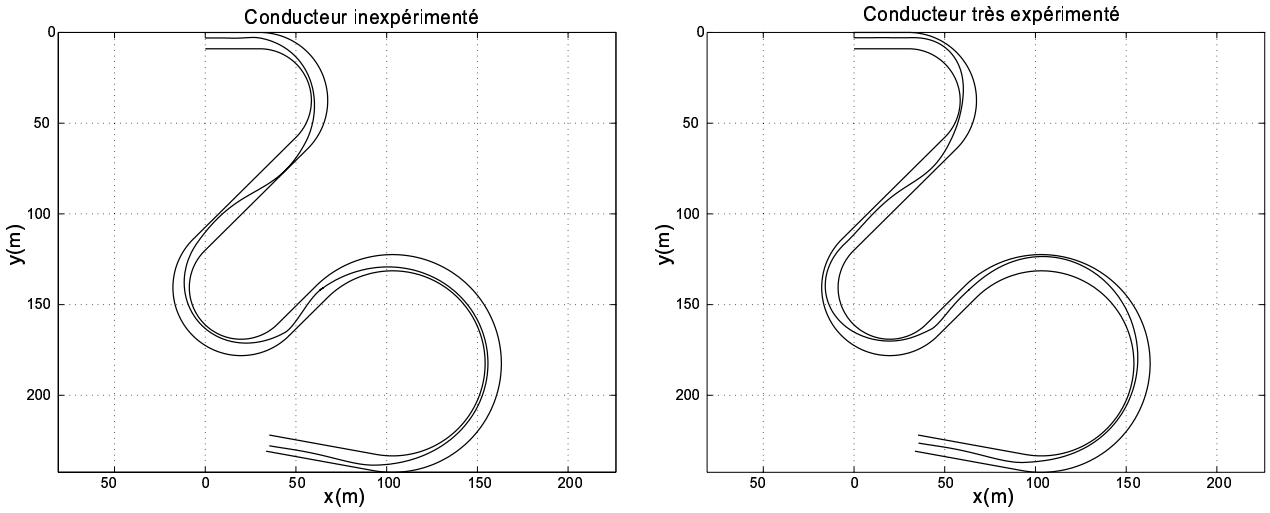


FIG. 6.23. : Génération de trajectoires : conducteur "inexpérimenté" et "très expérimenté"

6.6. Régulation de vitesse assistée par un dispositif de localisation

Cette section s'attache à décrire le module d'assistance longitudinale de NAICC. Les principes exposés dans le chapitre 4 ont fait l'objet du développement d'un modèle Matlab/Simulink exploitable en simulation (cf. §6.6.1.1), en simulation temps-réel avec ciblage du modèle sur l'"Autolab" (cf. §6.6.1.2) et finalement en conditions réelles (cf. §6.6.1.3). Avant d'illustrer les résultats obtenus, nous présentons succintement les principes de ces trois étapes de validation.

6.6.1. Implémentation pour la validation embarquée

Le développement du module longitudinal de NAICC sous Matlab/Simulink s'appuie sur l'architecture logicielle présentée dans la première partie de ce chapitre. En particulier, ce module suit le procédé de distribution de modèle entre le PC et l'"Autolab". Les tâches d'acquisition et de calcul sont dévolues à l'"Autolab", alors que le PC s'acquitte de l'interface utilisateur. Un processus basé sur les trois étapes successives de validation mentionnées précédemment a été suivi. Du fait de l'architecture logicielle mise en place, aucune modification majeure des modèles n'est nécessaire pour la transition d'une étape à l'autre.

6.6.1.1. Validation en simulation

La première phase de validation s'effectue en simulation (mais avec des données réelles), c'est-à-dire sans utiliser la plate-forme temps-réel QNX. Les données sont issues de fichiers de mesures enregistrés lors de diverses

campagnes d'essais. L'intégralité du modèle (partie "Interface Utilisateur" pour l'affichage et "Modèle d'exécution") est alors exécuté en local sur une machine de développement classique (cf. figure 6.24). Cette phase a pour objectif de valider les méthodes définies mais ne permet à aucun moment de certifier que le modèle satisfera les conditions de traitement temps-réel.

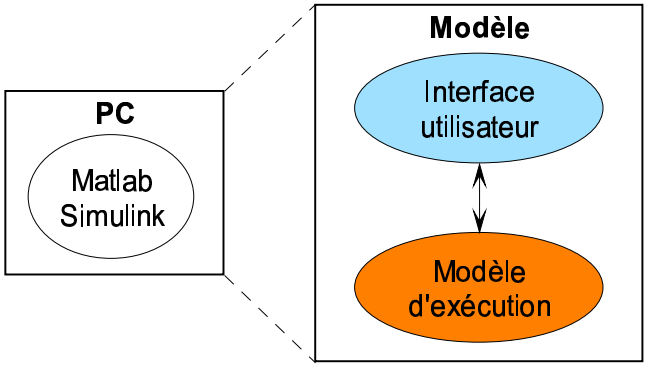


FIG. 6.24. : Principe de la validation en simulation

6.6.1.2. Validation en simulation "temps-réel"

Cette fois, le modèle est compilé et distribué sur la plate-forme PC-"Autolab". Les données utilisées lors de cette phase sont toujours issues de fichiers de mesures qui sont ciblés, comme la partie traitement du modèle, sur l'"Autolab".

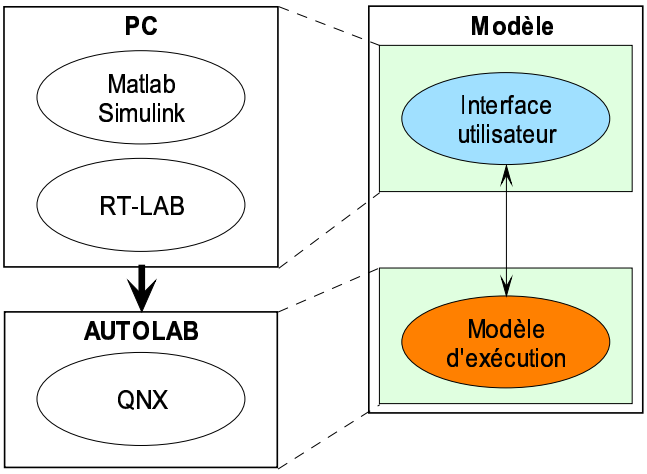


FIG. 6.25. : Validation en simulation "temps-réel"

Cette étape primordiale permet d'évaluer les durées de traitement des tâches développées afin de définir si celles-ci seront utilisables suivant les conditions d'expérimentation temps-réel choisies.

6.6.1.3. Validation en conditions réelles

Le procédé est identique à celui décrit pour la validation en simulation "temps-réel". La différence réside dans le fait que la validation s'effectue avec le véhicule, les données provenant directement des capteurs embarqués. Le comportement dynamique du système et la validité de la modélisation par rapport au processus réel peuvent de ce fait être évalués.

6.6.1.4. Modèle Simulink

Afin de garantir des temps d'exécution conformes aux exigences[10], certaines parties ont fait l'objet d'utilisation de S-fonction. Une S-fonction est une déclaration en langage informatique d'un système dynamique [SIM98]. Elle se base sur une description par représentation d'état du système et peut être implémentée en langage C.

Le modèle développé pour l'axe longitudinal intègre le module de localisation dont les résultats ont été décrits plus haut. Ce dernier a été implémenté sur la base de deux S-fonction programmées en C :

- la première fonction concerne la fusion multisensorielle et se justifie du fait de la nécessité, pour le filtrage de Kalman d'inverser plusieurs matrices,
- la deuxième est utilisée pour la reconstruction temps-réel du profil routier et la corrélation cartographique.

La figure 6.26 présente l'interface du modèle qui permet d'une part de suivre le déroulement du modèle d'exécution, et d'autre part d'intervenir en modifaint en temps-réel les paramètres de celui-ci. Les principaux paramètres configurables sont les données relatives au profil du conducteur et au véhicule.

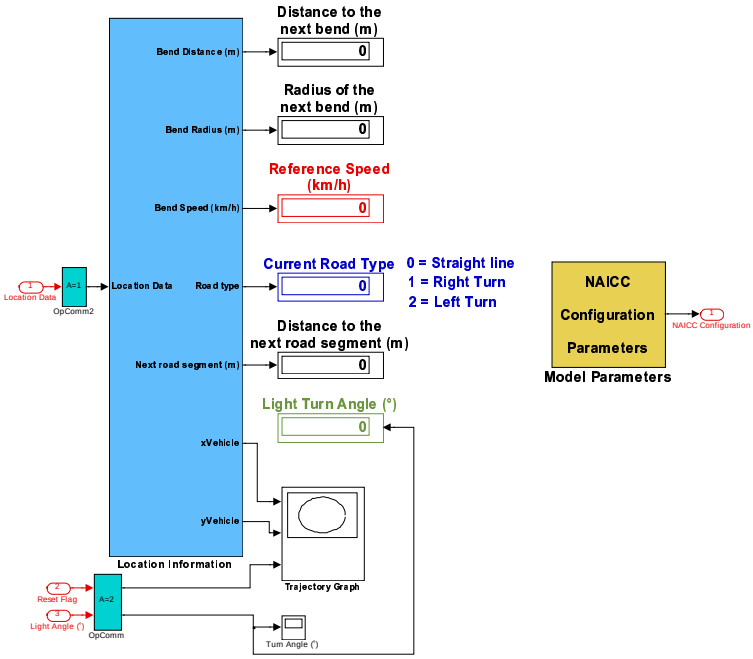


FIG. 6.26. : Interface du module longitudinal

Cette interface fournit des informations relatives à la situation de conduite actuelle et sur la situation à venir (virage ou ligne droite, rayon de courbure, distance jusqu'à la prochaine situation, vitesse de référence).

6.6.2. Simulation

6.6.2.1. Contexte et hypothèses

Les simulations ont consisté à comparer le profil de vitesse déterminé par NAICC à celui mesuré en conduite réelle. Ces essais proviennent de validation du système DGPS effectués sur "route ouverte" (départementale). Les fichiers DGPS ainsi générés ont été exploités pour effectuer la modélisation du profil suivant le procédé illustré au chapitre 4. Afin que les simulations et essais réels s'effectuent à iso-conditions, les hypothèses suivantes ont été posées :

[10]Le modèle est exécuté à une fréquence de 50 Hz (en rapport avec la fréquence d'acquisition des données), par conséquent les différentes tâches disposent de moins de 20 ms.

– le dispositif d'assistance (DAC) agit sur le système de freinage, le potentiel de décélération est fixé à -3 m/s^2,

– le potentiel d'accélération est constant et ne dépend pas du rapport de vitesse engagé. Il est fixé à 1.5 m/s^2,

– l'accélération transversale maximale en virage (définissant le critère de confort) est fixée à 2 m/s^2.

– le véhicule circulant sur une route départementale, la consigne de vitesse du régulateur est fixée à 25 m/s (90 km/h), conformément aux limitations en vigueur.

Par ailleurs, nous supposons que le conducteur ne modifie pas la consigne programmée pour la régulation de vitesse en ligne droite (mode "*Cruise Control*"). Seul le DGPS est employé pour assurer le positionnement précis du véhicule. Ce choix a été fait afin de focaliser la validation sur les performances de l'automate d'états finis.

6.6.2.2. Résultats

La figure 6.27a présente le parcours effectué par le véhicule alors que la figure 6.27b décrit le profil de vitesse mesuré et celui déterminé par le module longitudinal. La phase initiale durant laquelle le conducteur amène le véhicule à la vitesse de consigne n'est pas représentée.

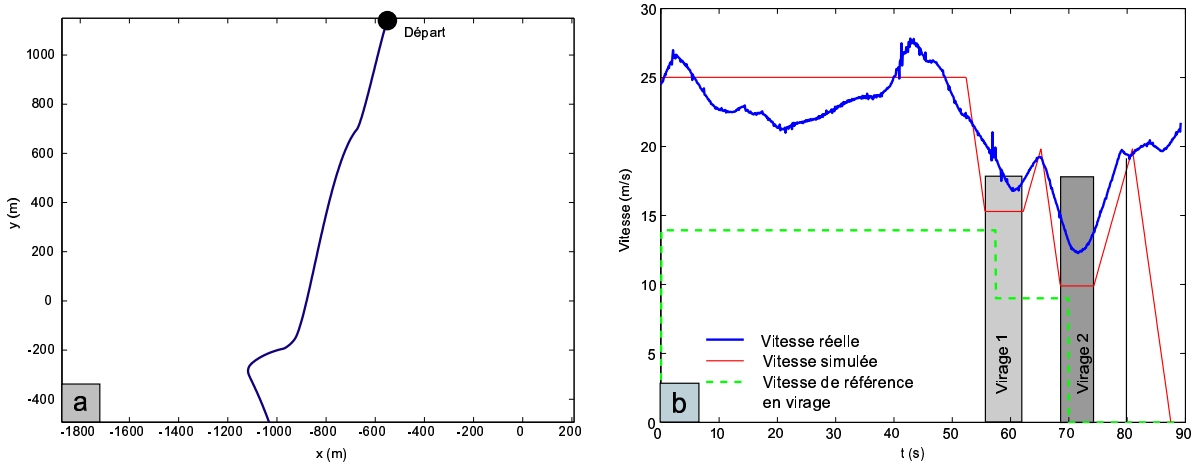


FIG. 6.27. : Validation en simulation

La figure 6.27b permet de conclure au bon fonctionnement, en simulation, de l'automate d'états finis. En outre, le tracé de la vitesse calculée par le DAC est relativement proche de la vitesse relevée lors de l'expérimentation. Notons toutefois la différence d'approche du premier virage : la phase de freinage du DAC intervient plus de 10 secondes après celle mesurée. Nous expliquons cela par le fait que cette courbe est précédée d'une longue ligne droite permettant au conducteur d'anticiper énormément. Ainsi, il ralentit peu à peu en levant simplement le pied de l'accélérateur et atteint le virage avec une vitesse convenable. L'intérêt de ces tests réside dans la comparaison entre la vitesse en courbe calculée par le système et la vitesse mesurée. Sur ce type de tracé, la détermination de la vitesse en courbe à partir du **critère de confort** défini dans le chapitre 4 (limitation des efforts transversaux), est un bon compromis.

Enfin, le tracé de la vitesse de référence déterminée pour la négociation des virages (courbe pointillée) illustre le caractère anticipatif du DAC : dès le départ, le système localise le premier virage et définit une vitesse de passage d'environ 14 m/s alors que la courbe est encore hors du champ de vision du conducteur. **C'est cette référence qui servira de consigne lors de l'utilisation du système en mode de régulation de vitesse.** Lorsque le virage est atteint, le dispositif identifie la prochaine phase de conduite nécessitant un freinage et détermine la consigne de vitesse respective. Notons finalement que le critère de confort choisi ($\gamma_T = 2$ m/s^2), procure des consignes de vitesses inférieures (témoignant d'un aspect sécuritaire renforcé) aux vitesses observées lors des essais.

L'illustration 6.28 présente d'une part l'évolution de la distance séparant le véhicule du prochain virage, et d'autre part la distance de freinage nécessaire à sa négociation[11]. Rappelons que cette seconde distance est définie selon la vitesse de passage de la courbe.

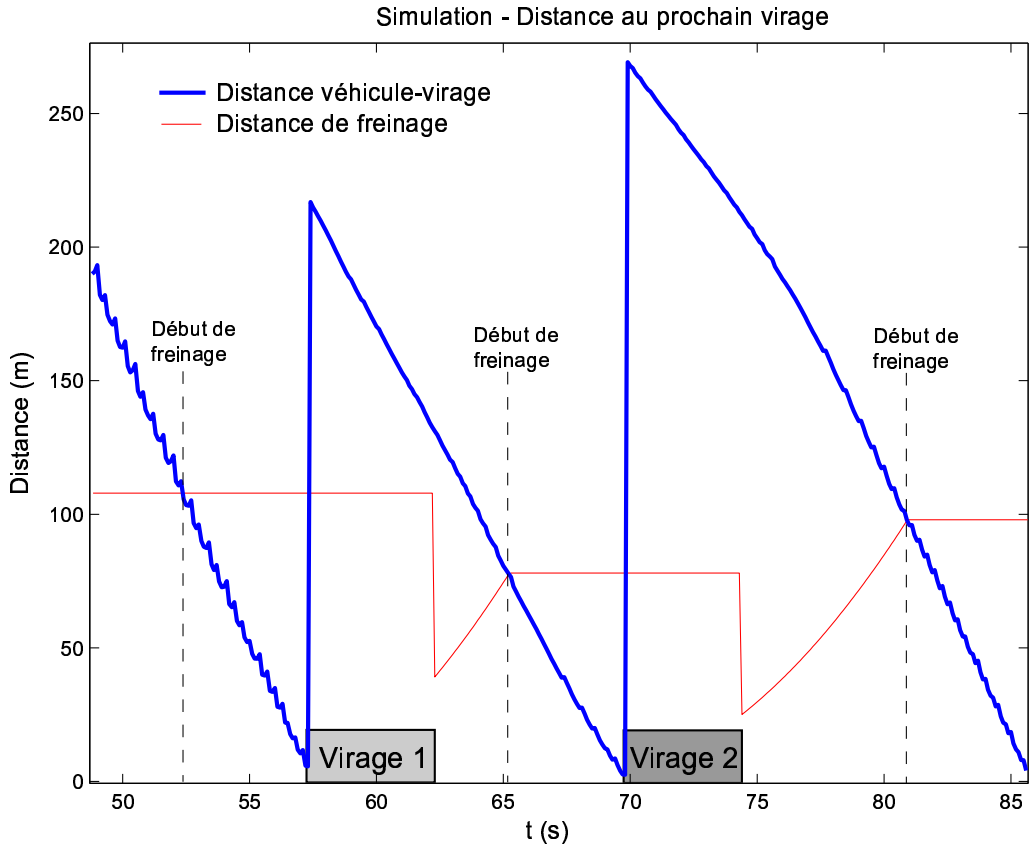


FIG. 6.28. : Distance de freinage appropriée

En corrélant cette figure avec la figure 6.27b, on constate que le freinage débute bien lorsque la distance entre le véhicule et le virage devient égale à la distance de freinage (respectivement 105 m pour le virage 1 et 75 m pour le virage 2). La vitesse de référence est atteinte avant l'entrée en virage (pas de freinage en courbe). Enfin, l'augmentation de la distance de freinage lorsque le véhicule quitte le virage s'explique par sa dépendance à la vitesse du véhicule. Selon les caractéristiques du profil suivant et selon l'évolution de la vitesse, le DAC réactualise constamment la distance de freinage nécessaire.

6.6.3. Test embarqué

6.6.3.1. Contexte et hypothèses

Lors des validations en conditions réelles, le but est de vérifier que l'ensemble du processus (la localisation avec reconstruction temps-réel de la cartographie, la détermination de la prochaine situation de conduite, la caractérisation de la phase de freinage et le calcul de la vitesse de référence) réponde aux exigences de calcul temps-réel.

Pour les résultats illustrés ci-après, des conditions d'essais identiques à celles spécifiées pour les validations en simulation ont été appliquées (paramètrage du modèle d'exécution, localisation basée sur le DGPS...). Le cadre géographique de ces validations est le même que précédemment. Ces tests ont été réalisés lors d'une campagne de validation d'un démonstrateur conçu pour NAICC. L'objectif de celui-ci, développé en partenariat avec la

[11] Nous avons volontairement, pour des raisons de lisibilité du graphe, omis la première partie de la courbe où le véhicule évolue en ligne droite à plus de 1500 m de la première courbe.

Région Alsace, était d'illustrer la faisabilité industrielle (en matière d'intégration) du DAC. Les différentes étapes de validation du démonstrateur ont permis de montrer l'intérêt du projet.

6.6.3.2. Résultats

Compte-tenu de conditions de réception DGPS différentes de celles rencontrées lors des essais présentés ci-dessus, le départ du véhicule a été effectué à l'autre extrémité du parcours. Par ailleurs, les données du DGPS ont été conservées telles que transmises par le récepteur (pas d'utilisation d'un repère local).

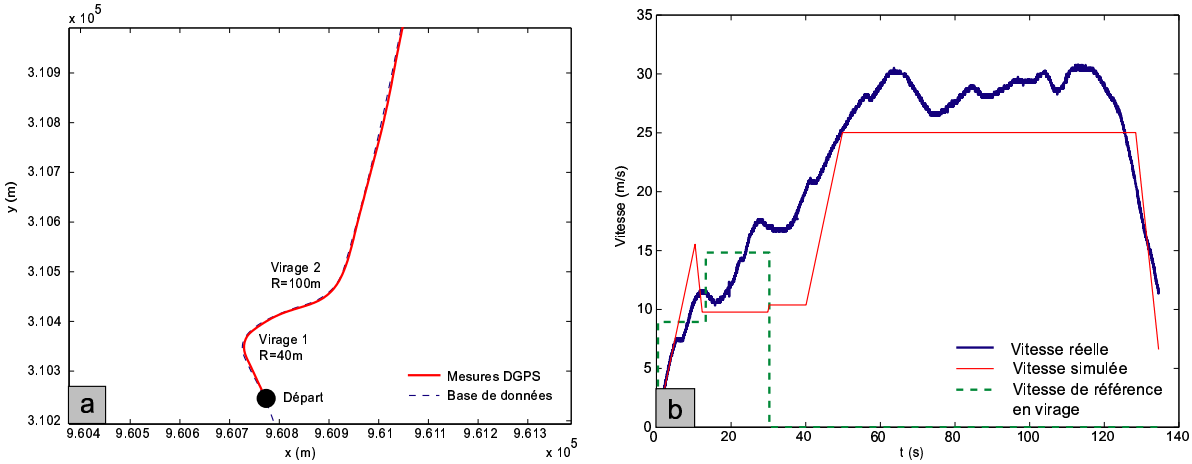


FIG. 6.29. : Validation en conditions réelles

Ces essais ont permis de valider le procédé de modélisation du profil routier et surtout sa reconstruction dans des conditions de calcul temps-réel (figure 6.29a). Le trajet modélisé correspond à la voie centrale de la route. A partir de la localisation du véhicule (issue du procédé de corrélation cartographique), NAICC localise le 1er virage et définit la consigne de vitesse ($\simeq$ 9 m/s). Notons que la phase d'accélération en début de parcours correspond exactement au style de conduite de l'automobiliste ("expérimenté"). On remarque également que la vitesse simulée avant le premier virage est supérieure à la vitesse réelle du véhicule. Néanmoins, le système effectue un freinage permettant de négocier le virage avec une allure (10 m/s) proche de l'allure réelle (11 m/s). A la sortie de cette première courbe, NAICC a identifié le virage suivant et a calculé une consigne de vitesse de l'ordre de 15 m/s (cf. courbe pointillée, figure 6.29b). Néanmoins, on constate que celui-ci réaccélère à peine. Ceci provient du fait que la distance de freinage serait alors trop courte pour atteindre la vitesse de référence. Cette courbe est négociée à environ 10 m/s et finalement le DAC peut accélérer jusqu'à atteindre l'allure de consigne du régulateur de vitesse, i. e. 25 m/s (90 km/h) pour le reste du parcours.

Ces différents résultats ont été obtenus, soit en simulation, soit en conditions réelles mais toujours lors d'une utilisation passive du dispositif d'aide à la conduite. En effet, les premières phases de validation illustrées ici ont eu pour rôle majeur de vérifier, dans des conditions idéales de conduite (localisation par DGPS, action sur le système de freinage), si NAICC était en mesure de déterminer des consignes de vitesses proches de la réalité. Les expérimentations réelles ont également permis d'évaluer les performances de l'architecture d'acquisition (capteurs, transmission de données...) développée dans ce projet.

6.7. Conclusion

Nous avons largement exposé dans cette partie la phase expérimentale relative au projet NAICC. Celle-ci a débuté par la mise en œuvre d'une plate-forme d'essais regroupant l'ensemble des composants nécessaires à l'asservissement d'un véhicule assisté par un dispositif de localisation. Un véhicule Renault Scenic équipé d'une boîte de vitesses automatique a fait l'objet de l'intégration de multiples capteurs, d'un régulateur de vitesse et finalement d'un système d'acquisition et de commande. La collaboration de l'ensemble de ces éléments s'appuie, d'un point de vue matériel, sur l'utilisation du protocole de communication CAN. Ce bus de terrain est particulièrement adapté à l'interconnection des systèmes dans l'automobile. D'un point de vue logiciel,

une architecture orientée objet a été définie pour assurer la gestion des capteurs et effecteurs par le système d'acquisition. Celle-ci procure une facilité de développement (ajout/suppression de composants matériels et/ou logiciels...) et d'extension de l'ensemble. En outre, elle permet un traitement unique des différents éléments d'instrumentation, quelque soit leur nature et comportement.

S'appuyant sur cette structure, différentes validations ont été effectuées. Dans une première partie, les résultats du procédé de localisation par filtrage de Kalman étendu (EKF) sont présentés. Nous montrons ainsi que l'estimation préliminaire de la vitesse de lacet est à l'origine de la suppression de la dérive sur ce type de capteur. Cette estimation, couplée aux observations du DGPS et aux informations de vitesses, est alors utilisée par l'EKF pour déterminer la position du véhicule. La localisation de ce dernier est obtenue grâce à l'utilisation de la base de données étendue, introduite dans le chapitre 5. Les résultats de modélisation du profil routier par courbes de Bézier sont illustrés dans la deuxième partie des expérimentations.

Une autre partie de ce chapitre se consacre à la modélisation trajectographique des conducteurs "inexpérimentés" et "très expérimentés". Après avoir présentés les résultats de la modélisation des trajectoires en courbe respectives à chaque catégorie, nous montrons un exemple de génération de trajectoires dans un profil complexe, i. e. une succession de lignes droites et de virages. Pour l'heure, ces travaux demeurent encore du stade de la simulation mais la structure du modèle de trajectoires retenu garantit son utilisation dans des conditions de calcul temps-réel.

La dernière partie de ce chapitre traite de l'assistance longitudinale et plus précisément de la validation de l'automate d'états finis. Dans le cadre de cet axe de recherche, deux types d'expérimentations ont été menés. Dans un premier temps, le modèle développé sous Matlab/Simulink a fait l'objet de tests en simulation avec des données réelles. Ces tests ont permis de définir la pertinence des solutions développées. Dans un deuxième temps, des simulations en conditions réelles (avec utilisation du dispositif d'acquisition "Autolab") et finalement des essais réels ont permis de mettre en évidence l'applicabilité de l'asservissement longitudinal assisté par un système de localisation.

Conclusion générale

"J'aimerais terminer sur un message d'espoir. Je n'en ai pas. En échange, est-ce que deux messages de désespoir vous iraient ?"

Woody Allen

Conclusions

La fonctionnalité première de l'automobile, transporter des passagers d'un endroit à un autre, est certainement la seule chose qui n'ait pas réellement évolué dans un domaine plus que jamais en effervescence. Essentiellement focalisés sur l'aspect sécuritaire pendant des années, les constructeurs dirigent à présent leurs recherches vers de multiples domaines : le respect de l'environnement, l'estéthique, le confort ou encore l'ergonomie de conduite... Il existe cependant un aspect fédérateur pour l'ensemble de ces travaux : le conducteur. Alors qu'il y a encore peu de temps, les développements étaient menés indépendamment de l'utilisateur principal, on place à présent celui-ci au centre des recherches. Le but étant de **créer des véhicules à l'image du conducteur**, et non pas de demander à ce dernier de s'adapter au véhicule.

L'un des centres d'intérêt actuels concerne le "véhicule intelligent" et plus particulièrement l'**assistance à la conduite**. C'est dans cette thématique que s'inscrivent les travaux présentés dans ce mémoire. Ceux-ci s'appuient sur la multiplication, dans un véhicule, d'une part des moyens de perception de l'environnement, et d'autre part des organes d'asservissement servant à soulager le conducteur. En outre, l'approche globale du projet *Navigation Aided Intelligent Cruise Control* (NAICC) initié dans cette thèse relève du couplage de plusieurs procédés d'assistance. Si la première étape concerne la régulation de vitesse assistée par un dispositif de localisation, l'intérêt de cette aide réside dans **le couplage de l'asservissement longitudinal et latéral** : lors de phases de conduite "critiques" (virages, dépassements...), un asservissement latéral peut s'avérer insuffisant pour effectuer la manœuvre dans des conditions de sécurité maximale.

Le premier chapitre a proposé une rapide description des éléments intervenant dans la phase de conduite : le conducteur, le véhicule et enfin l'environnement. Si ces acteurs sont clairement définis, la connaissance de leurs interactions, ou les répercussions de l'évolution de l'un d'eux demeurent encore mal établies. Ainsi, lors de la phase de conduite, l'automobiliste perçoit un grand nombre d'informations, à la fois du véhicule et de l'environnement. En outre, ses performances sont directement liées à son état physique, mental mais aussi aux conditions de conduite (densité du trafic, conditions météorologiques, etc...)... La connaissance de ces éléments est nécessaire pour définir le niveau d'assistance que l'on souhaite prodiguer.

Le deuxième chapitre se consacre à la description des assistances à la conduite et en particulier à leur intégration dans le système bouclé formé par le conducteur, le véhicule et l'environnement. Dans un deuxième temps, les objectifs du projet NAICC y sont exposés. Destiné à être un système d'assistance à la fois longitudinale (régulation de vitesse) et latérale (asservissement de la trajectoire), NAICC s'architecture autour d'un procédé de localisation du véhicule fondé sur une base de données étendue. L'objectif étant de promouvoir une **assistance (passive ou active) en fonction de la topologie de la route**.

La particularité de NAICC réside dans la volonté d'effectuer, à terme, une **commande longitudinale et latérale couplée**. Pour ce faire, nous proposons, dans le chapitre 3, de suivre un procédé consistant à fournir une trajectoire de référence sur laquelle le véhicule sera asservi. La trajectoire générée dans notre cas est issue de la **modélisation de trajectoires de deux classes de conducteurs**. L'intérêt est de définir un modèle de référence en adéquation avec le profil du conducteur. Les splines polaires retenus pour la modélisation de la trajectoire procurent l'avantage considérable d'identifier une trajectoire géométrique et d'y associer la vitesse de consigne adéquate (en fonction de contraintes cinématiques et dynamiques fixées).

L'assistance longitudinale de NAICC est exposée dans le chapitre 4. Tout comme pour la commande latérale, la régulation de vitesse assistée s'appuie sur l'identification d'un modèle en adéquation avec la phase de conduite. A partir d'un critère reflétant principalement le niveau de sécurité et de confort recherché par le conducteur, et en s'appuyant sur le modèle de trajectoire du chapitre 3, nous définissons la vitesse de consigne. Celle-ci est utilisée par un **automate d'états finis**, dont le but est de modéliser la dynamique longitudinale de la phase de prise de virage suivant quatre étapes (caractérisation du virage, phase de freinage, négociation à vitesse constante, réaccélération en sortie de virage).

L'assistance par localisation nécessite, d'une part la mise en œuvre de techniques de fusion multisensorielle, et d'autre part l'utilisation d'une cartographie de l'environnement. Effectivement, pour l'heure, il n'existe aucun capteur qui, utilisé indépendamment, permette de définir la position de manière précise (quelques mètres) à tout moment et quelque soit le milieu d'évolution du véhicule (circulation urbaine, extra-urbaine...). De même, les bases de données sur lesquelles s'appuient les dispositifs de navigation couramment disponibles ne disposent pas d'informations suffisantes pour envisager l'asservissement du véhicule. Ces deux points font l'objet du chapitre 5, et on montre notamment l'intérêt du développement de nouvelles bases de données et du stockage d'informations environnementales simples favorisant ce type d'assistance.

Lors de ces travaux, l'accent a été mis sur la volonté d'évaluer la faisabilité d'un tel dispositif. Ainsi, une partie de la thèse a consisté à l'**instrumentation du véhicule expérimental NADINE**. Ce travail est guidé par la volonté de l'équipe MIAM de conserver une homogénéité des équipements de ses différents véhicules expérimentaux. En outre, cela évite de diverger dans l'espace des solutions possibles et garantit un potentiel de réutilisabilité fort. Nous nous sommes particulièrement attaché à concevoir une architecture simple et évolutive, garantissant une souplesse d'utilisation. La solution obtenue est structurée, d'un point de vue matériel, autour d'un **bus CAN** qui interconnecte une grande partie des capteurs (hormis le DGPS) et effecteur (régulateur de vitesse) avec le système d'acquisition et de commande. D'un point de vue logiciel, une **architecture orientée objet** a été développée pour la gestion indépendante des entrées/sorties alors que le système d'acquisition est basé sur l'utilisation de Matlab/Simulink. Ce dernier choix permet, via un compilateur croisé, de cibler les modèles développés et validés classiquement en laboratoire, sans nécessiter leur réécriture. Le chapitre 6 décrit ce travail ainsi que les résultats obtenus sur la base de cette instrumentation, tant au niveau de la localisation du véhicule que de l'asservissement longitudinal. Les premiers résultats du module de génération de trajectoires obtenus en simulation y sont également présentés.

L'utilisation d'un système de localisation suffisamment précis laisse entrevoir un grand nombre d'applications d'assistance et d'asservissement dont certaines sont déjà à l'étude :

- régulation de vitesse en fonction de la situation de conduite (axe longitudinal de NAICC),
- asservissement de position en fonction de la situation de conduite (axe transversal de NAICC)[12],
- commande d'éclairages intelligents dont le but et de signaler au conducteur l'imminence d'une manœuvre ou de tout simplement éclairer l'endroit pertinent,
- ...

Il convient néanmoins de définir précisément les besoins des ces dispositifs en matière d'informations environnementales afin d'étendre les bases de données actuelles tout en limitant les ressources de stockage nécessaires.

[12] L'asservissement latéral nécessite encore un gain de précision au niveau de la localisation afin que les solutions soient fiables.

Perspectives

Les perspectives d'évolution d'un projet comme NAICC sont multiples. Dans un premier temps, il conviendrait de faire "tomber" quelques un des "verrous" inhérents aux hypothèses formulées pour mener à bien ces travaux. Un exemple concerne les situations d'utilisation d'un tel dispositif. Nous nous plaçons volontairement dans des conditions idéales (afin d'établir la faisabilité de l'ensemble) et ne tenons pour l'heure pas compte des **variations éventuelles des conditions de conduite**. Or, il est reconnu que c'est à ce niveau que les défaillances de conduite apparaissent le plus souvent, du fait principalement d'une mauvaise analyse de la situation. C'est pourquoi, l'équipe MIAM mène des travaux visant par exemple à la détection et à l'anticipation de situations potentiellement dangereuses.

Concernant la **modélisation de la dynamique longitudinale** effectuée dans le cadre de l'asservissement de vitesse, les travaux envisageables visent le profil de vitesse généré. Celui-ci décrit le comportement moyen des conducteurs : la phase de décélération permet d'atteindre l'entrée du virage avec la vitesse de référence déterminée pour cette manœuvre. Cette vitesse est alors maintenue durant toute la phase de négociation et la réaccélération ne se fait qu'à l'approche de la sortie. Dans le contexte de **modélisation du comportement du conducteur**, une évolution de la commande longitudinale pourrait concerner la génération d'un profil de vitesse en accord avec les phases de conduite exposées lors de l'analyse trajectographique. Le freinage pourrait être effectué jusqu'au point de braquage, voire jusqu'au point de plongée (conducteur "très expérimenté") alors que la réaccélération se ferait dès le point de corde. Dans un premier temps, nous avons opté pour un profil non optimal du point de vue de la modélisation du conducteur mais garantissant un niveau de sécurité maximal.

Par ailleurs, l'intégration supplémentaire d'un capteur de proximité pour la détection d'obstacles dynamiques par exemple (radar...) accroît davantage les potentialités d'un système comme NAICC. En effet, le système pourrait, en plus d'une perception absolue de l'environnement, être pourvu d'une perception relative (détection d'obstacles...), afin d'ajouter à l'asservissement topographique les capacités de dispositifs tel que l'ACC. De plus, avec l'émergence, et l'apparition dans le domaine automobile, des sciences et techniques de l'information et de la communication (STIC), une fonctionnalité de **gestion du trafic** pourrait permettre d'intégrer davantage la tâche de navigation dans ce type d'assistance. Une mise à jour des informations relatives aux conditions de conduite (par GSM, ...) aurait pour but d'adapter le système et de définir un nouvel itinéraire sur lequel un asservissement longitudinal et/ou latéral serait possible.

Finalement, une dernière voie de recherche que l'on peut mentionner concerne l'individualisation du système d'aide. Il est en effet primordial de ne pas fournir une aide satisfaisant la majorité des conducteurs, mais chaque conducteur en particulier. Pour ce faire, les systèmes d'assistance devront se baser, d'une part sur l'analyse (physique, physiologique...) du conducteur, et d'autre part sur des procédés de reconfiguration garantissant leur adaptation. Ainsi, notre équipe s'est investie dans l'étude du comportement visuel du conducteur. La conduite étant essentiellement basée sur des informations visuelles, l'étude de ces signaux demeure prometteuse dans la détermination du profil de l'automobiliste. Elles pourront par conséquent, à plus long terme, permettre d'établir un jugement sur le comportement du conducteur (sans nécessité l'instrumentation de celui-ci !) en vu de l'adaptation et de la reconfiguration des assistances...

Bibliographie

Première partie : Contexte

[AFO93] J. L. AFONSO, B. BRANDELON, B. HUERRE, J. M. G. SA DA COSTA, “Modelling of driver's open-loop steering behaviour”, Road Vehicle Automation Conference, 1993, pp. 125-133

[BAS99] M. BASSET, J. BAUJON, G. L. GISSINGER, “Intelligent driver aid system based on trajectory reconstruction for active safety”, IFAC World Congress, 1999, volume P, pp. 467-472

[BAU00] J. BAUJON, J. Ph. LAUFFENBURGER, Ph. CHERON, M. BASSET, G. L. GISSINGER, “A new low-cost tool for driver behavior analysis and studies”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, USA, 2000, pp. 569-574

[BEK02] E. BEKIARIS, K. WEVERS, A. AMDITIS, “Advanced driver monitoring - the AWAKE project”, 2002
URL :http ://i-sense.iccs.ntua.gr

[BEN02] A. BENSRHAIR, M. BERTOZZI, A. BROGGI, A. FASCIOLI, S. MOUSSET, G. TOULMINET, “Stereo vision-based feature extraction for vehicle detection”, IV'2002 Intelligent Vehicle Symposium, Paper N°122, 2002, France

[BRU90] J. BRUNET, D. JAUME, M. LABARRERE, A. RAULT, M. VERGÉ, “Détection et diagnostique de pannes, approche par modélisation”, Edition Hermès, Paris, 1990, ISBN 2-86601-241-0

[CHA96] Y. CHAMAILLARD, “Modélisation et identification de systèmes complexes. Application à des véhicules routiers en vue de l'étude d'un nouveau système de freinage”, Thèse de l'Université de Haute Alsace, 1996, Mulhouse, N° d'ordre 96MULH0437

[CHE96] D. C. CHEN, D. A. CROLLA, C. J. ALSTEAD, J. P. WHITEHEAD, “A comprehensive study of subjective and objective vehicle handling behaviour, Vehicle System Dynamics, Supplement 25, 1996, pp. 66-86

[DAG02] D. DAGLI, D. REICHARDT, “Motivation-based approach to behavior prediction”, IV'2002 Intelligent Vehicle Symposium, Paper N°38, 2002, France

[DAN00] C. DANG AN NINH, “Contribution au diagnostic et à la classification du conducteur d'un véhicule routier par des méthodes floues”, Thèse de l'Université de Haute Alsace, 2000, Mulhouse, N° d'ordre 2000MULH0608

[DON78] E. DONGES, “A two-level model of driver steering behavior”, Human Factors, vol. 20, N°6, 1978, pp. 691-707

[EVA91] L. EVANS, “Traffic safety and the driver”, Van Nostrand & Reinhold Editions, New-York, 1991, ISBN 0442001630

[FAR86] B. FAERBER, “Anstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fliessenden Verkehr”, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Band 35, 1986, pp. 8-17

[FON94] H. FONTAINE, Y. GOURLET, “Sécurité des véhicules et de leurs conducteurs”, Rapport INRETS n°175, 1994

[GIL92] T. D. GILLESPIE, “Fundamentals of vehicle dynamics”, SAE, 1992, ISBN 1-56091-199-9

[GIS97] G. L. GISSINGER, W. KORTÜM, “Simulation of vehicle system dynamics, state of the art and ongoing developments”, Transportation Systems’97, vol. 1, pp 215-222, Chania, Grèce

[GOD84] H. GODTHELP, P. MILGRAM, G. J. BLAAUW, “The development of a time-related measure to describe driving strategy”, Human Factors, vol. 26, N°3, 1984, pp. 257-268

[HAM97] M. HAMIDI, C. ROUSSEAU, “Contrôle de vitesse intelligent”, 1er congrès transversal “L’Homme - L’Automobile - La Route”, 1997, Rouen, France

[HIS96] Y. HISAOKA, M. YAMAMOTO, H. FUJIMINAMI, “A study on desirable steering response and steering torque for driver’s feeling”, Proceedings of AVEC’96, pp. 295-305

[HOR92] A. HORIGUCHI, T. SUETOMI, “A study on the human perception of yaw motion using the driving simulator”, SAE Technical Paper N°923086, 1992

[KON68] M. KONDO, A. AJIMINE, “Driver’s sight point and dynamics of the driver-vehicle-system related to it”, SAE Technical Paper N°680104, 1968

[KOP94] M. KOPF, “Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf der deutschen Autobahnen”, Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, N°203, 1994, VDI-Verlag

[KRA82] U. KRAMER, G. ROHR, “A model of driver behaviour”, Ergonomics, vol. 25, N°10, 1982, pp. 891-907

[KRA86] U. KRAMER, “Analyse mobiler Systeme”, VDI - Forschritt - Berichte, Reihe 12, N°77, 1986, VDI-Verlag

[KUI91] M. KUIKEN, J. A. GROGER, “Report on feedback requirements and performance differences of drivers”, Traffic Research Center, 1991

[LEA73] J. R. McLEAN, E. R. HOFFMANN, “The effects of restricted preview on driver steering control and performance”, Human Factors, vol. 15, N°4, 1973, pp. 421-430

[LEC92] D. LECHNER, C. PERRIN, “The actual use of the dynamic performances of vehicles”, Technical paper N°925180, XXIV FISITA Congress, 1992, Londres

[LEC93] D. LECHNER, C. PERRIN, “Utilisation réelle des capacités dynamiques des véhicules par les conducteurs, expérimentation sur routes 1992”, Rapport INRETS N°165, 1993

[LEU88] W. LEUTZBACH, “ Introduction to the theory of traffic flow”, Springer-Verlag Berlin, 1988

[MAJ98] R. MAJJAD, U. KIENCKE, H. KÖRNER, “Design of a hybrid driver model”, SAE Special Publications 1358, 1998, SAE Paper N° 980017

[MAY02] P. MAYENOBE, L. TRASSOUDAINE, T. BELLET, H. TATTEGRAIN-VESTE, “Cognitive simulation of driver and cooperative driving assistance”, IV’2002 Intelligent Vehicle Symposium, Paper N°141, 2002, France

[MIL95] W. F. MILLIKEN, D. L. MILLIKEN, “Race car vehicle dynamics”, Editions SAE International, 1995, ISBN 1-56091-526-9

[MIL99] P. MILLOT, “Systèmes Homme-Machine et automatique”, Journées doctorales d’automatique JDA’99, 1999, Nancy, France

[MUL96] N. MUELLER, “Development of a robust driver model with parameter adaptation”, Diplomarbeit, 1996

[NAT97] F. NATHAN, “Apport des systèmes d’aide au conducteur”, 1er congrès transversal “L’Homme - L’Automobile - La Route”, 1997, Rouen, France

[NAT98] F. NATHAN, “Ergonomics in driving support systems design process : example of intelligent cruise control”, Proceedings of FISITA’98, paper F98S206, 1998, France

[PAT98] A. PATTERSON, “Intelligent cruise control system impact analysis”, Thesis of the Virginia Polytechnic Institute
URL : http ://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-7898-13842/, 1998

[PIA02] N. LEFORT-PIAT, G. L. GISSINGER, “La voiture intelligente”, Hermès, Traité IC2, 2002, ISBN 2-7462-0512-2

[POR98] A. PORCEL, C. RUNDE, M. BASSET, G.L. GISSINGER, "Neuro-fuzzy approach to real time total velocity vector estimation of a passenger car covering critical situations", IFAC Workshop AAC'98, 1998, pp. 29-36

[POR01] A. PORCEL, P. LAURENCE, M. BASSET, G. L. GISSINGER, "Tire model for vehicle simulation : overview and real time solution for critical situations", IEEE Conference in Control Application, 2001, paper N°C-173

[PRI00] A. PRIEZ, "Attention, chercheurs à bord", revue R&D (Renault), La route de l'innovation, N°15, 2000, pp. 15-19

[RAS83] J. RASMUSSEN, "Skills, rules and knowledge ; signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, vol. 13, N°3, pp. 257-266

[REI81] L. D. REID, E. N. SOLOWKA, A. M. BILLING, "A systematic study of driver steering behavior", Ergonomics, 1981, vol. 24, pp. 447-462

[RIE40] P. RIECKERT, T. E. SCHUNCK, "Zur Fahrmechanik des Gummibereiften Kraftfahrzeugs", 1940, Ingenieur Archiv, pp. 210-224

[RIE90] A. RIEDEL, "A model of the real driver for use in vehicle dynamics simulation models", 1990, SAE Paper N°905102

[ROT93] J.A. ROTHENGATTER, H. ALM, M. J. KUIKEN, J.A. MICHON, W. B. VERWEY, "The driver, Generic Intelligent Driver Support", Taylor & Francis Editions, 1993

[SAM01] D. SAMMIER, "Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicules automobiles", Thèse de l'INPG, Grenoble, 2001

[SER98] C. SERAFIN, S. B. McLAUGHLIN, E. FARBER, "ACC human factors issues - results of evaluations", Proceedings of FISITA'98, paper F98S181, 1998, France

[SHI77] R. M. SHIFFRIN, W. SCHNEIDER, "Controlled and automatic human information processing : II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory", Psychological Review, vol. 84, N°2, 1977

[SHL98] S. E. SHLADOVER, "Intelligent transportation systems (ITS) and the automobile : recent history and future prospects", Proceedings of FISITA'98, paper F98S118, 1998, France

[SIV96] M. SIVAK, "The information that the driver uses : is it indeed 90% visual ?", Perception, vol. 25, 1996, pp. 1081-1089

[SMI72] V. SMIRNOV, "Cours de mathématiques supérieures", 2ème édition, Editions Mir, Moscou, 1972, ISBN 5-03-0000001-1

[SOT02] M. A SOTELO, F. J. RODRIGUEZ, L. MAGDALENA, "Vision-based navigation system for autonomous urban transport vehicles in outdoor environments", IV'2002 Intelligent Vehicle Symposium, Paper N°47, 2002, France

[TOO87] M. L. G. TOONE, "CARIN : A car information and navigation system", Philips technical review, vol. 43, N°11/12, pp. 317-329

[VAL95] M. VALLET, S. KHARDI, "Vigilance et transport : aspects fondamentaux, dégradation et prévention", Collections Transversales, 1995

[YUH98] N. YUHARA, J. TAJIMA, S. HORIUCHI, T. IIJIMA, N. ASANUMA, M. IKEGAYA, "Advanced driving support : Toward human-centered automation", Proceedings of FISITA'98, paper F98T652, 1998, France

[ZIN99] I. ZINDY-GIRAUD, "Conception et évaluation de nouvelles méthodes de diagnostic temps-réel : réalisation d'un système d'aide à la conduite de véhicule routier", Thèse de l'Université de Haute Alsace, 1999, Mulhouse

Deuxième partie : Contribution à l'assistance latérale et longitudinale d'un véhicule

[AFO93a] J. AFONSO, B. BRANDELON, B. HUERRE, J. M. G. SA DA COSTA, "Modélisation du comportement d'un conducteur désirant suivre une trajectoire", Congrès international de la Société des Ingénieurs Automobile, 1993

[AFO93b] J. AFONSO, B. BRANDELON, B. HUERRE, J. M. G. SA DA COSTA, "Modelling of driver's open-loop steering behaviour", Proceedings of the Road Vehicle Automation conference, 1993, pp. 125-133

[ALT99] C. ALTAFINI, "Curve negotiating using polar polynomials for nonholonomic vehicles", Proceedings of the 14th IFAC World Congress, 1999, vol. Q, pp. 139-146

[BAR01] M. J. BARTON, "Controller development and implementation for path planning and following in an autonomous urban vehicle", rapport pour l'obtention du diplôme de "Bachelor of Engineering", Australian Centre for Field Robotics (ACFR), Université de Sydney, 2001

[BAS99] M. BASSET, J. BAUJON, G. L. GISSINGER, "Intelligent driver aid system based on trajectory reconstruction for active safety", IFAC World Congress, 1999, volume P, pp. 467-472

[BIL77] A. M. BILLING, "Modelling driver steering in normal and severe manœuvres", 1977, Simulation Council Proceedings, vol. 7-2, chapitre 13, pp. 151-165

[BIR01] S. BIRCH, "Adaptive front lighting", SAE Journal, Automotive Engineering International, Décembre 2001, pp. 39-42

[DAM81] N. DAMIANOFF, "Beeinflussung und Schätzung von Fahrgeschwindigkeiten in Kurven", 1981, Veröffentlichungen des Institutes für Strassenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe

[DJA01] K. DJATH, "Contribution à la navigation mixte intérieur-extérieur d'un robot mobile", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 2001

[DON78] E. DONGES, "A two-level model of driver steering behavior", Human Factors, vol. 20, N°6, 1978, pp. 691-707

[DUB57] L. E. DUBINS, "On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents", American Journal of Mathematics, 1957, vol. 79, pp. 497-516

[EGE01] M. EGERSTEDT, X. HU, A. STOTSKY, "Control of mobile platforms using a virtual vehicle", IEEE Transactions on automatic control, 2001, vol. 46, N°11, pp. 1777-1782

[EGE98] M. EGERSTEDT, X. HU, A. STOTSKY, "Control of a car-like robot using a virtual vehicle approach", IEEE Conference on Decision and Control, 1998, vol. 4, pp. 1502-1507

[FRA02] T. FRAICHARD, A. SCHEUER, "From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths", à paraître dans IEEE Transactions on Robotics and Automation

[FRI96] H. FRITZ, "Neural speed control for autonomous road vehicles", Control Engineering Practice, 1996, vol. 4, N°4, pp. 507-512

[GAL00] A. GALLET, M. SPIGAI, M. HAMIDI, "Use of vehicle navigation in driver assistance systems", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000, pp. 492-497

[HAR97] H. J. von der HARDT, "Contribution au pilotage et à la localisation d'un robot mobile", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1997, N° d'ordre 97INPL120N

[HIT00] J. HITZ, J. KOZIOL, A. LAM, "Safety evaluation results from the field operational test of an intelligent cruise control (ICC) system", SAE Technical Paper, 2000, N° 2000-01-1352

[HOL97] H. HOLZMANN, Ch. HALFMANN, S. GERMANN, M. WUERTENBERGER, R. ISERMANN, "Longitudinal and lateral control and supervision of autonomous intelligent vehicles", Control Engineering Practice, 1997, vol. 5, N°11, pp. 1599-1605

[HOR90] A. R. A. Von Der HORST, "A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters", Thèse de l'Institut de Perception, TNO, 1990

[IIJ00] T. IIJIMA et al., "Development of an adaptive cruise control system with brake actuation", SAE Technical Paper, 2000, N°2000-01-1353

[KAN85] Y. KANAYAMA, N. MIYAKE, "Trajectory generation for mobile robots", Symposium of Robotic Research, 1985, pp. 333-340

[KON68] M. KONDO, A. AJIMINE, "Driver's sight point and dynamics of the driver-vehicle-system related to it", SAE Technical Paper N°680104, 1968

[KOM89] K. KOMORIYA, K. TANIE, "Trajectory control and design of wheel-type mobile robot using B-spline curve", IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1989, pp. 398-405

[LAU99] C. LAUGIER, T. FRAICHARD, P. GARNIER, I. E. PAROMTCHIK, A. SCHEUER, "Sensor-based control architecture for a car-like vehicle", Autonomous Robot, Kluwer Academic Publishers Boston, 1999, vol. 6, N°2, pp. 1-18

[LAU00a] J. Ph. LAUFFENBURGER, F. COFFIN, M. BASSET, G. L. GISSINGER, "A vehicle path-planning algorithm using polar polynomials optimised through fuzzy-logic", IFAC Conference on Mechatronic Systems, 2000, Darmstadt, Allemagne, vol. 1, pp. 139-144

[LAU00b] J. Ph. LAUFFENBURGER, J. BAUJON, M. BASSET, G. L. GISSINGER, "The NAICC project : a navigation aided intelligent cruise control", SAE2000 Transactions, Journal of Passenger Car - Electronic & Electrical Systems, Book V109-7, ISBN 0-7680-0891-3, 2001

[LAU03] J. Ph. LAUFFENBURGER, M. BASSET, F. COFFIN, G. L. GISSINGER, "Driver-aid system using path-planning for lateral vehicle control", Control Engineering Practice, volume 11/2, Février 2003, pp. 215-229

[LEC93] D. LECHNER, C. PERRIN, "Utilisation réelle des capacités dynamiques des véhicules par les conducteurs, expérimentation sur routes 1992", Rapport INRETS N°165, 1993

[LEE76] D. N. LEE, "A theory of visual control braking based on information about time-to-collision", Perception, 1976, N°5, pp. 437-459

[MAJ97] R. MAJJAD, "Hybride Modellierung und Identifikation eines Fahrer-Fahrzeug Systems", Thèse de l'Université de Karlsruhe, 1997

[MES99] Z. MESSAOUDENE, "Contribution au développement d'un générateur de trajectoires pour véhicules routiers", Rapport de Diplôme d'Études Approfondies de l'Université de Haute-Alsace, 1999, Mulhouse

[MOU72] R. R. MOURANT, T. H. ROCKWELL, "Strategies of visual search by novice and experienced drivers", Human Factors, 1972, vol. 14, N°4, pp. 325-335

[NAA94] K. NAAB, G. REICHART, "Driver assistance systems for lateral and longitudinal vehicle guidance - Heading control and active cruise support", International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC'94, 1994, pp. 449-454

[NAG01] B. NAGY, A. KELLY, "Trajectory generation for car-like robots using cubic curvature polynomials", Field & Service Robots 2001, Finlande, 2001

[NEL89a] W. NELSON, "Continuous-curvature paths for autonomous vehicles", IEEE Conference on Robotics and Automation, Scotsdale, Arizona, 1989, vol. 3, pp. 1260-1264

[NEL89b] W. NELSON, "Continuous steering-function control of robot carts", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1989, vol. 36, N°3, pp. 330-337

[PEN91] H. PENG, M. TOMIZUKA, "Optimal preview control for vehicle lateral guidance", PATH Research report UCB-ITS-PRR-91-16, 1991

[PEN93] H. PENG, M. TOMIZUKA, "Preview control for vehicle lateral guidance in highway automation", Journal of dynamic systems, measurement and control, 1993, vol. 115, pp. 679-686

[PEN94] H. PENG, W. ZHANG, M. TOMIZUKA, S. SHLADOVER, "A reusability study of vehicle lateral control system", Vehicle System Dynamics, 1994, vol. 23, pp. 259-278

[PIN96a] O. PINCHARD, A. LIEGOIS, F. POUGNET, "Generalized polar polynomials for vehicle path generation with dynamic constraints", IEEE Conference on Robotics and Automation, 1996, vol. 1, pp. 915-920

[PIN96b] O. PINCHARD, “Algorithmes génétiques et apprentissage pour la planification de mouvements et la navigation de robots mobiles”, Thèse de l’Université de Montpellier II, 1996, N° d’ordre 96MON2155

[PRE00] W. PRESTL, T. SAUER, J. STEINLE, O. TSCHERNOSTER, “The BMW active cruise control ACC”, SAE Technical Paper, 2000, N°2000-01-0344, Intelligent Vehicle Systems, SP-1538

[RAM01] R. RAMIREZ MENDOZA, M. M’SAAD, L. DUGARD, “Some advanced control techniques for automatic steering of road vehicles”, Vehicle System Dynamics, Special Issue (ICTAM2000), 2001, n°35, pp. 165-180

[REE90] J. A. REEDS, L. A. SHEPP, “Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards”, Pacific Journal of Mathematics, 1990, vol. 145, N°2, pp. 367-393

[ROS98] M. M. ROSER, Y. MOISSIDIS, “Advanced driver assistance, warning, and control systems”, Proceedings of FISITA’98, paper F98S203, 1998, France

[SAV99] A. R. SAVKOOR, S. AUSEJO, “Analysis of driver’s steering and speed control strategies in curve negociation”, Vehicle System Dynamics, 1999, N°. 33, pp. 94-109

[SCH96a] A. SCHEUER, T. FRAICHARD, “Planning continuous-curvature paths for car-like robots”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, 1996, vol. 3, pp. 1304-1311

[SCH96b] J. SCHIEHLEN, W. SCHWERTBERGER, “Adaptive cruise control for coaches”, International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC’96, 1996, pp. 1351-1365

[SCH97] A. SCHEUER, T. FRAICHARD, “Collision-free and continuous-curvature path planning for car-like robots”, IEEE Conference on Robotics and Automation, 1997

[SIN89] S. J. SINGH, D. H. SHIN, “Position based path tracking for wheeled mobile robots”, IEEE/RSJ Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1989, pp. 386-391

[SHA00] R. S. SHARP, D. CASANOVA, P. SYMONDS, “A mathematical model for driver steering control, with design tuning and performance results”, Vehicle System Dynamics, 2000, vol. 33, pp. 289-326

[SHI77] D. SHINAR, E. McDOWELL, T. H. ROCKWELL, “Eye movements in curve negociation”, Human Factors, 1977, vol. 19, N°1, pp. 63-71

[TAM94] K. TAMURA, H. SEKINE, Y. NAKAMURA, N. ASANUMA, “A study of self-reliant cornering speed control system”, IEEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference, 1994, pp. 441-444

[TAK89] A. TAKAHASHI, T. HONGO, Y. NINOMIYA, “Local path planning and control for AGV in positioning”, IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, 1989, pp. 392-395

[WIT00] J. S. WIT, “Vector pursuit path tracking for autonomous ground vehicles”, Thèse de l’Université de Floride, 2000

[ZAD65] L. A. ZADEH, “Fuzzy sets”, Information and Control, 1965, vol. 8, n°3, pp. 338-353

Troisième partie : Validation des concepts développés

[ALU01] R. ALUR, ”Model-based design of embedded software”, 2001
URL : http ://www.cis.upenn.edu/˜alur

[ANT95] R. T. ANTHONY, “Principles of data fusion automation”, Artech House, London, 1995, ISBN 0-89006-760-0

[ARN93] Ph. ARNOULD, “Etude de la localisation d’un robot mobile par fusion de données”, Thèse de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, N° d’ordre 93INPL095N, 1993

[AZZ02] M. AZZALINI, G. L. GISSINGER, V. BOUSSAOUAR, P. COUTANT, “Computation of a variable steering ratio with a fuzzy logic method”, Intelligent Vehicles Symposium IV’2002, 2002, Paper N°IV-125

[BAR94] B. BARSHAN, H. F. DURRANT-WHYTE, “Evaluation of solid-state gyroscope for robotics applications”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994, vol. 44, N°1, pp. 61-67

[BAR95] B. BARSHAN, H. F. DURRANT-WHYTE, “Inertial navigation systems for mobile robots”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, vol. 11, N°3, pp. 328-342

[BAS99] M. BASSET, J. BAUJON, G. L. GISSINGER, “Intelligent driver aid system based on trajectory reconstruction for active safety”, IFAC World Congress, 1999, volume P, pp. 467-472

[BER98] D. BERNSTEIN, A. KORNHAUSER, “Map matching for personal navigation systems”, The Transportation Research Board, 1998

[BEZ87] P. BEZIER, “Mathématiques et CAO”, vol. 4, “Courbes et surfaces”, 2ème édition, Hermès, Paris, 1987, ISBN 2-86601-080-9

[BON96] Ph. BONNIFAIT, G. GARCIA, “A multisensor localization algorithm for mobile robots and its real-time experimental validation”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996, pp. 1395-1400

[BON01a] J. B. BONNET, J. Ph. LAUFFENBURGER, “Architecture de l’instrumentation du véhicule NADINE”, Rapport technique MIPS/MIAM, 2001

[BON01b] J. B. BONNET, “Fusion de données pour la localisation d’un véhicule routier”, Rapport de DEA de l’Université de Haute Alsace, Mulhouse, 2001

[BOO92] G. BOOCH, ”*Conception Orientée Objets et Applications”*, Addison-Wesley, 1992, ISBN 2- 87908-004-5

[BOR96] J. BORENSTEIN, H. R. EVERETT, L. FENG, “Where am I ? Sensors and methods for mobile robot positionning”, University of Michigan, 1996

[BOT97] S. BOTTON, F. DUQUENNE, Y. EGELS, M. EVEN, P. WILLIS, “GPS localisation et navigation”, Editions Hermès, 1997, ISBN 2-86601-570-3

[BOU00] D. BOUVET, “Contribution à la localisation d’engins de chantiers routiers”, Thèse de l’Université de Nantes, N° ordre ED 0366-005, 2000

[BOU02] P. BOURON, “Méthodes ensemblistes pour le diagnostic, l’estimation d’état et la fusion de données temporelles”, Thèse de l’Université de Technologie de Compiègne, 2002

[BRO92] R. G. BROWN, P. HWANG, “Introduction to random signals and applied kalman filtering”, 2nd Edition, John Wiley and Sons, 1992, ISBN 0-471-52573-1

[CHA96] K. CHAO, “Measurements of path and others parameters in motor vehicle dynamics tests and their errors”, Vehicle System Dynamics, 1996, N°26, pp. 321-342

[COO94] S. B. COOPER, H. DURRANT-WHYTE, “A kalman filter model for GPS navigation of land vehicles”, IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems, 1994, pp. 157-163

[COO96] S. B. COOPER, “A frequency response method for sensor suite selection with an application to high-speed vehicle navigation”, Thèse de l’Université d’Oxford, 1996

[DEL99] F. DELLAERT, D. FOX, W. BURGARD, S. THRUN, “Monte carlo localization for mobile robots”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, , 1999, Detroit, USA, pp. 1322-1328

[DEM68] A. P. DEMPSTER, “A generalization of bayesian inference”, Journal of the royal statistical society, vol. 30 (B), 1968

[DUB88] D. DUBOIS, H. PRADE, “Théorie des possibilités. Application à la connaissance en informatique”, Méthodes & programmes, Edition Masson,France, 1988

[FOX99] D. FOX, W. BURGARD, F. DELLAERT, S. THRUN, “Monte carlo localization : efficient position estimation for mobile robots”, 1999, National Conference on Artificial Intelligence

[FUE00] T. FUEHRER, B. MÜLLER, W. DIETERLE, F. HARTWICH, R. HUGEL, M. WALTHER, “Time-triggered communication on CAN”, Proceedings of the International CAN Conference, 2000, Amsterdam, http ://www.can-cia.de/can/ttcan

[GAE99] N. GAERTNER, ”Patterns métier et architectures génériques pour la commande et la supervision de processus”, Thèse de l’Université de Haute Alsace, 1999, N° d’ordre 99MULH0567

[GAM95] E. GAMMA, “Design patterns, elements of reusable O.O. software”, Addison-Wesley, 1995, ISBN 2-84180-054-7

[GIR02] G. GIRARDIN, J. Ph. LAUFFENBURGER, “Module de commande du cruise control”, Rapport technique MIPS/MIAM, 2002

[GIS02] G. L. GISSINGER, M. BASSET, J. Ph. LAUFFENBURGER, J. BAUJON, "Le projet NAICC : une régulation de vitesse intelligente assistée par le système de navigation pour véhicule automobile", CIMASI'02, Casablanca, Maroc, 2002

[GRE02] J. S. GREENFELD, "Matching GPS observations to locations on a digital map", Research Report of the New Jersey TIDE Center, 2002
URL : http ://www.njtide.org

[INF01] INFINEON, "C167CR/C167SR 16-bit single-chip microcontroller", Manuel d'utilisateur, V3.2, 2001
URL ://http :www.infineon.com

[JEN00] P. JENSFELT, D. J. AUSTIN, O. WILJK, M.ANDERSSEN, "Feature based condensation for mobile robot localisation", 2000, IEEE Interational Conference on Robotics and Automation, pp. 2531-2537

[JO96] T. JO, M. HASEYAMA, H. KITAJIMA, "A map-matching method with the innovation of the kalman filtering", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 1996, Vol. E79-A, N°11, pp. 1853-1855

[JOU99] S. JOUANNIN, "Association et fusion de données : application au suivi et à la localisation d'obstacle par radar à bord d'un véhicule routier intelligent", Thèse de l'Université Blaise Pascal, N° d'ordre DU1095, Clermont-Ferrand, 1999

[JUL95] S. J. JULIER, J. K. UHLMANN, H. F. DURRANT-WHYTE, "A new approach for filtering nonlinear systems", American Control Conference, 1995, pp. 1628-1632

[JUL97a] S. J. JULIER, H. F. DURRANT-WHYTE, S. B. COOPER, "A localization system for a high-speed land vehicle", International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, SPIE, 1997

[JUL97b] S. JULIER, J. K. UHLMANN, "A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems", International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, SPIE, 1997

[KOB94] K. KOBAYASHI, S. KAWASAKI, K. WATANABE, "Accurrate navigation via sensor fusion of GPS and rate-gyro", Vehicle Navigation and Information Systems Conference VNIS'94, 1994, pp. 449-454

[LAU98] P. LAURENCE, "Modélisation de systèmes complexes, stables et pseudostables. Application à l'étude du comportement en régime établi des véhicules routiers", Thèse de l'Université de Haute Alsace, 1998, Mulhouse, N° d'ordre 98MULH0516

[LEE01] E. A. LEE, "Computing for embedded systems", IEEE Instrumentation and Measurement Technologies Conference, Budapest, 2001

[LEO91] J. C. LEON, "Modélisation et constructions de surfaces pour la CFAO", Hermès, Paris, 1991, ISBN 2-86601-273-9

[LOE02] J. LOEWENAU, "Final enhanced map database requirements", 2002, NextMAP Project
URL : http ://www.ertico.com/activiti/projects/nextmap/public_d.htm

[MAR89] D. C. MARSH, "Database design, developpment and access consideration for automotive navigation", Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1989, pp. 337-340

[MAR98] C. MARSELLI, "Data Processing of a Navigation Microsystem", Thèse de l'Université de Neuchâtel, Suisse, 1998

[MAY79] P. MAYBECK, "Stochastic models, estimation and control", vol. 1, Academic Press, New-York, 1979

[MUL97] P. A. MULLER, "Modélisation objet avec UML", Editions Eyrolles, ISBN 2-212-08966-X, 1997

[NAJ02] M. E. El NAJJAR, Ph. BONNIFAIT, "Multi-criteria fusion for the selection of roads of an accurate map", 15th IFAC Congress on Automatic Control, 2002, Barcelona, Spain

[NEB97] E. M. NEBOT, H. DURRANT-WHYTE, S. SCHEDING, "Frequency domain modeling of aided GPS with application to high-speed vehicle navigation systems", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997, pp. 1892-1897

[PAN02] J. C. PANDAZIS, "NextMAP, Final Report", 2002
URL : http ://www.ertico.com/activiti/projects/nextmap/public_d.htm

[PAR96] D. PARET, "Le bus CAN", Editions DUNOD, ISBN 2100047647, 1996

[OUD00] N. OUDJANE, “Stabilité et approximations particulaires en filtrage non linéaire. Application au pistage”, Thèse de l’Univeristé de Rennes I, 2000

[SAR98] A. SAROLDI, “In-Arte : system architecture definition”, 1998
URL : http ://www.iao.fraunhofer.de/Projects/IN-ARTE/

[SCH97a] S. SCHEDING, “High integrity navigation”, Thèse de l’Université de Sydney, Australian Centre for Field Robotics, 1997
URL : http ://www.acfr.usyd.edu.au/

[SCH97b] S. SCHEDING, G. DISSANAYAKE, E. NEBOT, H. DURRANT-WHYTE, “Slip modelling and aided inertial navigation of an LHD”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997, pp. 1904-1909
URL : http ://www.acfr.usyd.edu.au/

[SHA76] G. SHAFER, “A mathematical theory of evidence”, Princeton University Press, 1976

[SHL98] S. E. SHLADOVER, “Intelligent transportation systems (ITS) and the automobile : recent history and future prospects”, Proceedings of FISITA’98, paper F98S118, 1998, France

[SIM98] SIMULINK, “Writing S-functions”, Manuel d’utilisateur, 1998

[SUK00] S. SUKKARIEH, “Low cost, high integrity, aided inertial navigation systems for autonomous land vehicles”, Thèse de l’Université de Sydney, Australian Centre for Field Robotics, 2000
URL : http ://www.acfr.usyd.edu.au/

[TEX99] P. Y. TEXIER, “Du transport intelligent à la route intelligente”, 17^{eme} colloque GRETSI, 1999

[WAL90] E. WALTZ, J. LLINAS, “Multisensor data fusion”, Artech House, London, 1990, ISBN 0-89006-277-3

[WEN00] J. WENDEL, C. SCHLAILE, G. F. TROMMER, “Comparaison of error state space and total state space Kalman filter for integrated navigation systems”, IAR Annual Meeting, 2000

[YUH98] N. YUHARA, J. TAJIMA, S. HORIUCHI, T. IIJIMA, N. ASANUMA, M. IKEGAYA, “Advanced driving support : Toward human-centered automation”, Proceedings of FISITA’98, paper F98T652, 1998, France

[ZHA97] Y. ZHAO, “Vehicle location and navigation systems”, Artech-House Publisher, Boston-London, ISBN 0-89006-861-5, 1997

Annexe

[OGA95] K. OGATA, “Discrete-time control systems”, 1995, Prentice Hall Editions, ISBN 0-13-328642-8

Annexes

Annexe A

Estimation des données gyrométriques : Covariance du bruit d'état

Afin de déterminer la matrice de covariance $Q(k)$ du bruit d'état, nous considérons une représentation d'état, dans le domaine continu, du système. La matrice de covariance s'obtient alors par discrétisation du processus. L'annexe ci-après présente la démarche suivie pour l'estimateur des données du gyromètre présenté au chapitre 5.

A.1. Modèle continu de l'estimateur

Le modèle continu décrivant le processus d'estimation des mesures du gyromètre est défini par la représentation d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}}(t) &= F_c(t)\mathrm{x}(t) + \mathrm{w}(t) \\ \begin{bmatrix} \dot{\psi}(t) \\ \ddot{\psi}(t) \\ \dddot{\psi}(t) \\ \dot{x}_{ff}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi(t) \\ \dot{\psi}(t) \\ \ddot{\psi}(t) \\ x_{ff}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_{\ddot{\psi}_k} \\ w_{ff_k} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{A.1}$$

où $F_c(t)$ représente la matrice de transition exprimée dans le domaine continu. Les éléments non-nuls du bruit d'état $\mathbf{w}(t)$ sont tous considérés gaussiens, à moyennes nulles et avec pour écarts-type respectifs $\sigma_{\ddot{\psi}}$ et σ_{ff}.

A.2. Discrétisation du modèle

La discrétisation de la matrice de transition est donnée par l'expression [OGA95] :

$$\begin{aligned} F &= e^{F_c \cdot T_{ech}} \\ &= \mathrm{I} + T_{ech} \cdot F_c + \frac{T_{ech}^2 \cdot F_c^2}{2} + ... \\ &= \begin{bmatrix} 1 & T_{ech} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_{ech} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{A.2}$$

On montre, de même, que le vecteur d'état $\mathbf{x}$ à l'instant k est défini par la relation [MAY79] :

$$\mathrm{x}(k) = F(T_{ech})\mathrm{x}(k-1) + \int_{k-1}^{k} F(T_{ech})\mathrm{w}((k-1)T_{ech}+\tau)d\tau \tag{A.3}$$

A.3. Matrice de covariance du bruit d'état

Le deuxième terme de la relation (A.3) représente l'expression discrète du bruit d'état $\mathbf{w}(k)$.

$$\begin{aligned}
\mathrm{w}(k) &= \int_{k-1}^{k} F(T_{ech}-\tau)\mathrm{w}((k-1)T_{ech}+\tau)d\tau \\
&= \int_{k-1}^{k} \begin{bmatrix} 1 & T_{ech}-\tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_{ech}-\tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_{\ddot{\psi}}((k-1)T_{ech}+\tau) \\ w_{ff}((k-1)T_{ech}+\tau) \end{bmatrix} d\tau \\
&= \int_{k-1}^{k} \begin{bmatrix} 0 \\ (T_{ech}-\tau)w_{\ddot{\psi}}((k-1)T_{ech}+\tau) \\ w_{\ddot{\psi}}((k-1)T_{ech}+\tau) \\ w_{ff}((k-1)T_{ech}+\tau) \end{bmatrix} d\tau
\end{aligned} \tag{A.4}$$

La matrice de covariance du bruit de modélisation est définie dans le domaine discret par :

$$\begin{aligned}
Q &= \mathrm{E}[\mathrm{w}(i)\mathrm{w}^T(j)] \\
&= \mathrm{E}\left[\int_{k-1}^{k} \begin{bmatrix} 0 \\ (T_{ech}-\tau)w_{\ddot{\psi}}(iT_{ech}+\tau) \\ w_{\ddot{\psi}}(iT_{ech}+\tau) \\ w_{ff}(iT_{ech}+\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ (T_{ech}-\tau)w_{\ddot{\psi}}(jT_{ech}+\tau) \\ w_{\ddot{\psi}}(jT_{ech}+\tau) \\ w_{ff}(jT_{ech}+\tau) \end{bmatrix}^T d\tau\right]
\end{aligned} \tag{A.5}$$

En considérant le bruit d'état décorrélé, les termes croisés s'annulent et on peut écrire :

$$\mathrm{E}[w(t)w(\tau)] \equiv \sigma^2\delta(t-\tau) \tag{A.6}$$

ce qui se traduit finalement par la matrice de covariance ci-dessous :

$$Q(k) = \int_{k-1}^{k} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (T_{ech}-\tau)^2\sigma^2_{\ddot{\psi}} & (T_{ech}-\tau)\sigma^2_{\ddot{\psi}} & 0 \\ 0 & (T_{ech}-\tau)\sigma^2_{\ddot{\psi}} & \sigma^2_{\ddot{\psi}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma^2_{ff} \end{bmatrix} d\tau \tag{A.7}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}T^3_{ech}\sigma^2_{\ddot{\psi}} & \frac{1}{2}T^2_{ech}\sigma^2_{\ddot{\psi}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}T^2_{ech}\sigma^2_{\ddot{\psi}} & T_{ech}\sigma^2_{\ddot{\psi}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{ech}\sigma^2_{ff} \end{bmatrix} \tag{A.8}$$

Annexe B

Fusion multisensorielle pour la localisation : Covariances du filtre de Kalman étendu

Nous avons montré dans le chapitre 5 que la matrice de covariance $P(k+1 \mid k)$ de l'erreur de prédiction de l'EKF est donnée par :

$$P(k+1 \mid k) = A(k)P(k \mid k)A^T(k) + B(k)Q_\gamma B^T(k) + Q_\alpha \tag{B.1}$$

où Q_γ et Q_α sont respectivement la covariance exprimée sur les mesures proprioceptives (V_{L_k}, V_{T_k}, $\widetilde{\dot{\psi}_k}$), et sur les bruits du modèle. Les matrices $A(k)$ et $B(k)$ représentent les matrices jacobiennes définies par les relations (B.2) :

$$A(k) = \frac{\partial F(\mathrm{x},\, \mathrm{u})}{\partial \mathrm{x}} \text{ et } B(k) = \frac{\partial F(\mathrm{x},\, \mathrm{u})}{\partial \mathrm{u}} \tag{B.2}$$

B.1. Linéarisation du processus

La linéarisation s'effectue autour de la dernière estimation effectuée par le filtre de Kalman. Elle nécessite la détermination des matrices jacobiennes $A(k)$ et $B(k)$:

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T_{ech}(V_{T_k}\cos\widehat{\psi_k} + V_{L_k}\sin) \\ 0 & 1 & T_{ech}(V_{L_k}\cos\widehat{\psi_k} - V_{T_k}\sin\widehat{\psi_k}) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{B.3}$$

$$B(k) = \begin{bmatrix} T_{ech}\cos\widehat{\psi_k} & -T_{ech}\sin\widehat{\psi_k} & 0 \\ T_{ech}\sin\widehat{\psi_k} & T_{ech}\cos\widehat{\psi_k} & 0 \\ 0 & 0 & T_{ech} \end{bmatrix} \tag{B.4}$$

B.2. Bruits de mesure, d'état et d'observation

Les différentes matrices de covariance des bruits du système utilisées pour la mise en œuvre de cet estimateur sont illustrées ci-dessous. Dans tous les cas, les bruits ont été considérés décorrélés, gaussiens, centrés et à moyennes nulles.

La vitesse de lacet intervenant dans le vecteur de commande ($\mathrm{u}_k = (V_{L_k}, V_{T_k}, \widehat{\dot{\psi}}_k)$) n'est pas issue d'une mesure directe mais d'une première étape d'estimation. Par conséquent, on représentera dans la matrice de covariance sur les données mesurées Q_γ la covariance sur $\widehat{\dot{\psi}}$ par sa valeur déterminée dans l'annexe A. La matrice de covariance Q_γ est finalement définie par l'expression :

$$Q_\gamma = \begin{bmatrix} \sigma^2_{V_L} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2_{V_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}T^3_{ech}\sigma^2_{\ddot{\psi}} \end{bmatrix} \tag{B.5}$$

La matrice de covariance des bruits d'état s'exprime par la relation :

$$Q_\alpha = \begin{bmatrix} \sigma^2_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2_\psi \end{bmatrix} \tag{B.6}$$

Finalement, les bruits d'observation sont définis par la matrice de covariance suivante :

$$Q_\beta = \begin{bmatrix} \sigma^2_{gps} & 0 \\ 0 & \sigma^2_{gps} \end{bmatrix} \tag{B.7}$$

Annexe C

Splines polaires : Expressions formelles des paramètres

Nous allons présenter dans cette annexe la détermination des paramètres du spline polaire relatif au conducteur “inexpérimenté”. Rappelons que pour ce dernier, le polynôme polaire obtenu est d'ordre 7, et qu'il convient donc de définir les expressions des 8 paramètres en fonction des contraintes de continuité imposées.

Le cas de figure du conducteur “très expérimenté” est analogue à celui illustré ci-dessous. Le modèle comporte néanmoins 9 paramètres dont les expressions, plus complexes, sont déterminées de la même manière.

C.1. Hypothèses et formulation générale

Un total de 8 conditions de continuité a été défini dans le cadre de la modélisation trajectographique du conducteur “inexpérimenté”. Ces contraintes et leurs incidences respectives sur le spline polaire sont discutées ci-après. Rappelons dans un premier temps les critères retenus, l'expression du modèle polaire, ses dérivées première et seconde et finalement l'expression de la courbure définie dans un repère polaire.

$$\text{pour } \phi = 0 \quad \Rightarrow \quad r = R_0,\ r' = r'_0,\ \kappa = \kappa_0 \tag{C.1}$$
$$\text{pour } \phi = \phi_C \quad \Rightarrow \quad r = R_C,\ r' = 0 \tag{C.2}$$
$$\text{pour } \phi = \alpha \quad \Rightarrow \quad r = R_\alpha,\ r' = r'_\alpha,\ \kappa = \kappa_\alpha \tag{C.3}$$

$$r(\phi) = a_0 + a_1\phi + a_2\phi^2 + a_3\phi^3 + \ldots + a_7\phi^7 \tag{C.4}$$

Les dérivées première et seconde du rayon polaire $r(\phi)$ par rapport à l'angle polaire ϕ sont :

$$r'(\phi) = a_1 + 2a_2 \cdot \phi + 3a_3\phi^2 + \ldots + 7a_7\phi^6 \tag{C.5}$$
$$r''(\phi) = 2a_2 + 6a_3\phi + \ldots + 42a_7\phi^5 \tag{C.6}$$

La courbure est fonction du rayon ainsi que de ses dérivées première et seconde :

$$\kappa = \frac{r^2 + 2r'^2 - rr''}{\left(r^2 + r'^2\right)^{3/2}} \tag{C.7}$$

A partir de ces différentes expressions et des conditions de continuité, il est possible de définir le système d'équations à résoudre afin d'obtenir une expression formelle des paramètre a_0 à a_7.

C.2. Définition du système d'équations

Pour ce faire, il est nécessaire d'étudier les conditions imposées pour chaque point (entrée de virage, point de corde et sortie de virage). D'après la relation (C.1), et en substituant l'angle polaire ϕ par 0 dans les expressions du rayon, de la dérivée et de la courbure, il vient aisément :

$$a_0 = R_0 \tag{C.8}$$
$$a_1 = r'_0 \tag{C.9}$$
$$a_2 = \frac{1}{2}\frac{R_0^2 + 2r_0'^2 - \kappa_0(R_0^2 + r_0'^2)^{3/2}}{R_0} \tag{C.10}$$

A partir des contraintes imposées aux points de corde et de sortie (relations (C.2) et (C.3)), on obtient finalement un système de 5 équations à 5 inconnues. L'ensemble des inconnues (paramètres du spline polaire) est fonction des indicateurs (R_0, R_C, R_α, r'_0...) synthétisés lors de l'étude trajectographique du conducteur.

$$a_3\phi_C^3 + \ldots + a_7\phi_C^7 = R_C - a_0 - a_1\phi_C - a_2\phi_C^2 \tag{C.11}$$
$$3a_3\phi_C^2 + \ldots + 7a_7\phi_C^6 = -a_1 - 2a_2\phi_C \tag{C.12}$$
$$a_3\alpha^3 + \ldots + a_7\alpha^7 = R_\alpha - a_0 - a_1\alpha - a_2\alpha^2 \tag{C.13}$$
$$3a_3\alpha^2 + \ldots + 7a_7\alpha^6 = r'_\alpha - a_1 - 2a_2\alpha \tag{C.14}$$
$$6a_3 \cdot \alpha + \ldots + 42a_7\alpha^5 = \frac{R_\alpha^2 + 2r_\alpha'^2 - \kappa_\alpha(R_\alpha^2 + r_\alpha'^2)^{3/2}}{R_\alpha} - 2a_2 \tag{C.15}$$

C.3. Résolution formelle

La résolution formelle du système d'équations présenté ci-dessus est réalisée avec le logiciel Maple. Afin de simplifier quelque peu les expressions des paramètres, on pose :

$$A = R_C - a_0 - a_1\phi_C - a_2\phi_C^2 \tag{C.16}$$
$$B = -a_1 - 2a_2\phi_C \tag{C.17}$$
$$C = R_\alpha - a_0 - a_1\alpha - a_2\alpha^2 \tag{C.18}$$
$$D = r'_\alpha - a_1 - 2a_2\alpha \tag{C.19}$$
$$E = \frac{R_\alpha^2 + 2r_\alpha'^2 - \kappa_\alpha(R_\alpha^2 + r_\alpha'^2)^{3/2}}{R_\alpha} - 2a_2 \tag{C.20}$$

Finalement en se basant sur les relations (C.11) à (C.15) et (C.16) à (C.20), les expressions suivantes sont obtenues pour les paramètres a_0 à a_7 :

$$
\begin{aligned}
a_0 &= R_0 \\
a_1 &= r'_0 \\
a_2 &= \frac{1}{2}\frac{R_0^2 + 2r_0'^2 - \kappa_0(R_0^2 + r_0'^2)^{3/2}}{R_0} \\
a_3 &= -\frac{1}{2}\left[\frac{8\phi_C^7 D\alpha - \phi_C^7 E\alpha^2 - 20\phi_C^7 C - 20\phi_C^6 D\alpha^2 + 2\phi_C^6 E\alpha^3 + 56\phi_C^6 \alpha C}{\alpha^3\phi_C^3\left(6\alpha^2\phi_C^2 + \phi_C^4 - 4\alpha^3\phi_C - 4\alpha\phi_C^3 + \alpha^4\right)}\right. \\
&\quad \left.\frac{+12\phi_C^5\alpha^3 D - \phi_C^5 E\alpha^4 - 42\phi_C^5\alpha^2 C - 2\phi_C^2\alpha^6 B + 2\phi_C\alpha^7 B + 14\phi_C\alpha^6 A - 8\alpha^7 A}{\alpha^3\phi_C^3\left(6\alpha^2\phi_C^2 + \phi_C^4 - 4\alpha^3\phi_C - 4\alpha\phi_C^3 + \alpha^4\right)}\right] \\
a_4 &= \frac{-15\phi_C^8 C - \phi_C^8 E\alpha^2 + 7\phi_C^8 D\alpha - 10\phi_C^7 D\alpha^2 + 24\phi_C^7\alpha C + \phi_C^7 E\alpha^3 - 9\phi_C^6\alpha^3 D + \phi_C^6 E\alpha^4 + 21\phi_C^6\alpha^2 C}{\alpha^4\phi_C^4\left(6\alpha^2\phi_C^2 + \phi_C^4 - 4\alpha^3\phi_C - 4\alpha\phi_C^3 + \alpha^4\right)} \\
&\quad \frac{-42\phi_C^5\alpha^3 C + 12\phi_C^5\alpha^4 D - \phi_C^5\alpha^5 E - 3\alpha^6 B\phi_C^3 + 21\alpha^6 A\phi_C^2 + 2\phi_C^2\alpha^7 B - 6\phi_C\alpha^7 A + \phi_C\alpha^8 B - 3\alpha^8 A}{\alpha^4\phi_C^4\left(6\alpha^2\phi_C^2 + \phi_C^4 - 4\alpha^3\phi_C - 4\alpha\phi_C^3 + \alpha^4\right)} \\
a_5 &= -\frac{1}{2}\left[\frac{6\phi_C^8 D\alpha - \phi_C^8 E\alpha^2 - 12\phi_C^8 C + 12\phi_C^7 D\alpha^2 - 2\phi_C^7 E\alpha^3 - 24\phi_C^7\alpha C - 54\phi_C^6\alpha^3 D + 6\phi_C^6 E\alpha^4}{\left(\phi_C^2 - 2\alpha\phi_C + \alpha^2\right)^2\phi_C^4\alpha^5}\right. \\
&\quad \frac{+126\phi_C^6\alpha^2 C - 2\phi_C^5\alpha^5 E - 84\phi_C^5\alpha^3 C + 24\phi_C^5\alpha^4 D - 42\phi_C^4\alpha^4 C + 12\phi_C^4\alpha^5 D - \phi_C^4\alpha^6 E - 6\alpha^6 B\phi_C^3}{\left(\phi_C^2 - 2\alpha\phi_C + \alpha^2\right)^2\phi_C^4\alpha^5} \\
&\quad \left.\frac{+42\alpha^6 A\phi_C^2 + 12\phi_C\alpha^7 A + 6\phi_C\alpha^8 B - 18\alpha^8 A}{\left(\phi_C^2 - 2\alpha\phi_C + \alpha^2\right)^2\phi_C^4\alpha^5}\right] \\
a_6 &= \frac{6\phi_C^7 D\alpha - \phi_C^7 E\alpha^2 - 12\phi_C^7 C - 9\phi_C^6 D\alpha^2 + \phi_C^6 E\alpha^3 + 21\phi_C^6\alpha C + 14\phi_C^5\alpha^2 C + \phi_C^5 E\alpha^4 - 8\phi_C^5\alpha^3 D}{\left(\phi_C^3 + 3\alpha^2\phi_C - 3\alpha\phi_C^2 - \alpha^3\right)\left(\phi_C - \alpha\right)\alpha^5\phi_C^4} \\
&\quad \frac{-35\phi_C^4\alpha^3 C + 11\phi_C^4\alpha^4 D - \phi_C^4\alpha^5 E - \alpha^5 B\phi_C^3 + 7\phi_C^2\alpha^5 A - 2\phi_C^2\alpha^6 B + 14\phi_C\alpha^6 A + 3\phi C\alpha^7 B - 9\alpha^7 A}{\left(\phi_C^3 + 3\alpha^2\phi_C - 3\alpha\phi_C^2 - \alpha^3\right)\left(\phi_C - \alpha\right)\alpha^5\phi_C^4} \\
a_7 &= -\frac{1}{2}\left[\frac{-16D\phi_C^5\alpha^2 + 6D\phi_C^6\alpha - 12\phi_C^6 C - 6\alpha^6 A + 12\alpha^5\phi_C A - 2\alpha^5\phi_C^2 B + 36\alpha\phi_C^5 C + 2\alpha^6 B\phi_C}{\alpha^5\phi_C^4\left(6\alpha^2\phi_C^2 + \phi_C^4 - 4\alpha^3\phi_C - 4\alpha\phi_C^3 + \alpha^4\right)}\right. \\
&\quad \left.\frac{-30\alpha^2 C\phi_C^4 - E\phi_C^6\alpha^2 + 2E\phi_C^5\alpha^3 - E\phi_C^4\alpha^4 + 10D\phi_C^4\alpha^3}{\alpha^5\phi_C^4\left(6\alpha^2\phi_C^2 + \phi_C^4 - 4\alpha^3\phi_C - 4\alpha\phi_C^3 + \alpha^4\right)}\right]
\end{aligned}
$$

PERSONNES HABILITEES A DIRIGER LES RECHERCHES
Au 1er JANVIER 2003

NOMS, PRENOMS	Section CNU	INTITULE	UFR
ADOLPHE Dominique	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
DREAN Jean Yves	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
DUPUIS Dominique	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
RENNER Marc	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
VIALLIER-RAYNARD Pierre	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
AMBS Pierre	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
AUBRY Evelyne	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ESSAIM
BINDER Gérard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
GISSINGER Gérard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
HASSENFORDER Michel	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
METZGER Gérard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal **(Emérite 1/9/02)**	ESSAIM
SCHMITT François-Marie	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
THIRION Bernard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
BOLMONT Dominique	28	Milieux denses et matériaux	FST
BORDEMANN Martin	25	Mathématiques	FST
BRILLARD Alain	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques	FST
BRIGHI Bernard	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques	FST
BRILHAC J.François	62	Energétique, génie des procédés	FST
BROGLY Maurice	33	Chimie des matériaux	FST
CHEZEAU Jean-Michel	31	Chimie theorique, physique, analytique	FST
DELFOSSE Lucien	62	Energétique , génie des procédés	FST
DURAND Bernard	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	FST
EHRBURGER Pierre	62	Energétique , génie des procédés	FST
GABELICA Zelimir	32	Chimie organique, minérale, industrielle	FST
GEWINNER Gérard	28	Milieux denses et matériaux	FST
GILOT Patrick	62	Energétique, génie des procédés	FST
GOZE Michel	25	Mathématiques	FST
GRESSER Julien	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	FST
GUTH Jean-Louis	33	Chimie des matériaux	FST
HANGAN Théodore	25	Mathématiques (**EMERITE 1/9/2002)**	FST
KALT André	35	Structure et évolution de la Terre et des autres planètes	FST
KHAKIMDJANOV You	25	Mathématiques	FST
KUBLER Lucien	28	Milieux denses et matériaux	FST
LAVILLE-SAINT-MARTIN Bernard	30	Milieux dilués et optique	FST
LE DRED Ronan	35	Structure et évolution de la Terre et des autres planètes	FST
LOEGEL Bernard	28	Milieux denses et matériaux	FST
LUTZ Robert	25	Mathématiques	FST
PIRRI Carmelo	28	Milieux denses et matériaux	FST
ROTH Jean-Pierre	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques	FST
MUCKENSTURM Bernard	32	Chimie organique, minérale, industrielle **(EMERITE 01/9/02)**	FST
SARI Tewfi	25	Mathématiques	FST
SCHULTZ Jacques	33	Chimie des matériaux	FST
SPEHNER Jean-Claude	27	Informatique	FST
STAUFFER Louise	28	Milieux denses et matériaux	FST
URBAN Jean-Philippe	61	Génie informatique, automatique Traitement signal	FST
WENDLING Serge	27	Informatique	FST
WETZEL Patrick	28	Milieux denses et matériaux	FST
ACCARY Armand	62	Energétique, Génie des procédés	ENSCMu
CAULLET Philippe	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
DONNET Jean-Baptiste	33	Chimie des matériaux **(EMERITE 1/09/2002)**	ENSCMu
DUMAS Philippe	33	Chimie des matériaux	ENSCMu
EUSTACHE Jacques	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
FLEURY Jean-Pierre	32	Chimie organique, minérale, industrielle **(EMERITE 1/09/2002)**	ENSCMu
FOUASSIER Jean-Pierre	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
GOSPODINOVA Natalia	33	Chimie des matériaux	ENSCMu
JACQUES Patrice	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
LE DRIAN Claude	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
LOUATI Alain	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
NEUNLIST Serge	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
PENIGAULT Edouard	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
STREITH Jacques	32	Chimie organique, minérale, industrielle **(EMERITE 1.9.2002)**	ENSCMu
RIESS Gérard	33	Chimie des matériaux **(EMERITE 1.9.2001)**	ENSCMu
WALTER Serge	31	Chimie théorique, physique, analytique	ENSCMu

NOMS, PRENOMS	Section CNU	INTITULE	UFR
BLAES Rainer	29	Constituants élémentaires	**IUTC**
BROGLY Sophie	33	Chimie des Matériaux	**IUTM**
CHARLES François	29	Constituants élémentaires	**IUTM**
FABRE Bernard	62	Energétique, génie des procédés	**IUTC**
JACQUEY Serge	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	**IUTM**
LIENHARD Claude	1	Droit Privé et Sciences Criminelles	**IUTC**
MERCKLE Jean	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	**IUTM**
MEYER Jean-Marie	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	**IUTM**
SCHULTZ Guy	63	Electronique, optronique et systèmes	**IUTM**
TUILIER Marie Hélène	28	Milieux denses et matériaux	**IUTM**
WALTER Bernard	65	Biologie Cellulaire	**IUP BIOL**

1.2 Professeurs d'Université LETTRES - DROIT

BLOCH Peter	12	Langues et littératures germaniques et scandinaves	FLSH
COUDRY Marianne	21	Histoire et civilisations : mondes anciens et mondes médiévaux de l'art.	FLSH
DE POLI Luigi	14	Langues et littératures romanes : italien (Habilité)	FSES
FAURE Michel	11	Langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes	FLSH
FLUCK Pierre	72	Epistémologie, histoire des Sc.et Techniques	FLSH
FREYBURGER M.Laure	8	Langues et littératures anciennes	FLSH
HOANG Patrice	1	Droit Privé et Sciences Criminelles	FSES
HUDLETT Albert	12	Langues et littératures germaniques et Scandinaves	FLSH
KAMMERER Odile	21	Histoire et civilisations : mondes anciens et mondes médiévaux de l'art.	FLSH
KELLER André	5	Sciences Economiques	FSES
LYSOE Eric	10	Littératures comparées	FLSH
MOSSER François	11	Langues et Littératures anglaises et anglo-saxonnes - **EMERITE 1/9/2001**	FLSH
REMORIQUET Jack	70	Sciences de l'Education	IUPC
ROUSVOAL Jacques	70	Sciences de l'Education (Habilité)	CUFEF
SALMON Gilbert	9	Langues et littératures françaises	FLSH
SCHMITT Evelyne	12	Langues et littératures germaniques et Scandinaves	FSES
SCHNYDER Peter	9	Langues et littératures françaises	FLSH

1.3 Assimilés Professeurs d'Université

BRENDLE Marcel		Tribologie	CNRS
NARDIN Michel		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
REITER Gunter		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
VIDAL Alain		Systèmes moléculaires complexes	CNRS

DECKER Christian		Systèmes moléculaires complexes	ENSCMu
LOUGNOT Daniel Joseph		Molécules,structures et interactions	ENSCMu
PATARIN Joël		Chimie minérale	ENSCMu

1.4 Maîtres Conférences (Docteurs d'Etat ou habilités)

APERY François	25	Mathématiques (Habilité)	FST
BIGUE-BUENO Marie-Ange	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil (Habilitée)	ENSITM
BISCHOFF Jean-Luc	28	Milieux denses et matériaux (Habilité)	FST
BRENDLE Jocelyne	32	Chimie organique, minérale, industrielle (Habilitée)	FST
BURGET Dominique	31	Chimie théorique, physique, analytique (Habilité)	FST
CHEVALLIER Nicolas	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques (Habilité)	FST
HAMIEH Tayssir	33	Chimie des Matériaux (Habilité)	FST
KLEIN Robert	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	FST
LALLAM Abdelaziz	33	Chimie des matériaux	ENSITM
AKESBI Samir	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques (Habilité)	FST
GADIOU Roger	62	Energétique, génie des procédés (Habilitée)	FST
MARTZ Pierre	33	Chimie des Matériaux	FST
SCHACHER Laurence	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil (Habilitée)	ENSITM
TROUVE Gwenaëlle	62	Energétique, génie des procédés (Habilitée)	FST

ANDERSON Patrick	7	Sciences du language : linguistique et phonétique générales (Habilité)	FLSH
CONSIDERE Marie-Claire	11	Langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes (Habilitée)	FSESJ
LEMAITRE Alain	22	Histoire et Civilisations : histoire des mondes modernes	FLSH
POLIZZI Gilles	9	Langues et littératures françaises (Habilité)	FLSH
SCHEUBEL Joseph	5	Sciences Economiques	FSESJ

NOMS, PRENOMS	Section CNU	INTITULE	UFR
ALEBOYEH Azam	62	Energétique, Génie des procédés	ENSCMu
ALEBOYEH Hamied	62	Energétique, Génie des procédés	ENSCMu
ALLONAS Xavier	31	Chimie théorique, physique, analytique (Habilité)	ENSCMu
HURTREZ Guy	33	Chimie des matériaux	ENSCMu
RONDEAU Céline	32	Chimie organique, minérale, industrielle (Habilitée)	ENSCMu
ABADIE Jean-Pierre	6	Sciences de gestion	IUTC
FEUERBACH Marie-France	1	Droit privé et sciences criminelles (Habilitée)	IUTC
LEBEAU Thierry	68	Biologie des Organismes (Habilité)	IUTC
LORENTZ Pascal	61	Génie Informatique, automatique, traitement signal (Habilité)	IUTC
NOSAL Claude	71	Sciences de l'Information et de la communication (Habilité)	IUTC
ECKENSCHWILLER Michèle	70	Sciences de l'Education	SERFA

1.5 Assistants et autres enseignants (Docteurs d'Etat ou habilités)

JUNG Paul	2	Droit public	IUTC
WANG Tong Kuan	33	Chimie des matériaux (Habilité)	ENSCM

2. Chargés de Recherche, Ingénieurs d'Etudes, etc ....
(Docteurs d'Etat ou habilités)

2.1 C.N.R.S

BALARD Henri		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
HAIDAR Bassel		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
HAIDARA Hamidou		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
JADA Amane		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
VALLAT Marie France		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
VIX Cathie		Elements de transition, interfaces et catalyse	CNRS

2.2 ENSCMu

BARON Jacques		Sciences Terre et Synthèse minérale ; Chimie Anal.	ENSCMu
BISSERET Philippe		Chimie organique	ENSCMu
DEFOIN Albert		Chimie organique	ENSCMu
MORLET-SAVARY Christiane		Chimie physique (Habilitée)	ENSCMu
SOULARD Michel		Elements de transition,Interface et Catalyse	ENSCMu
TSCHAMBER Théophile		Chimie organique	ENSCMu

Résumé

Contribution à la surveillance temps-réel du système "Conducteur - Véhicule - Environnement" : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite

Le sujet de cette thèse vise l'intégration dans une automobile de fonctions d'observation, de supervision, d'aide à la décision ou encore de commande. La problématique est le développement d'une assistance à la conduite longitudinale et latérale basée sur la localisation du véhicule. Le but est de signaler et corriger les faiblesses de conduite en considérant les paramètres du véhicule, du conducteur et la topologie de la route. Selon la localisation du véhicule, une trajectoire de référence et la vitesse associée sont déterminées en fonction du conducteur et de la phase de conduite. Ces références sont utilisées pour effectuer le contrôle du véhicule ou pour informer le conducteur de l'inadéquation de ses consignes.

Dans ce contexte, la localisation du véhicule et particulièrement les informations de l'environnement d'évolution doivent être pertinentes. Elles sont obtenues grâce à une base de données cartographique spécifiquement développée dans le cadre de ces travaux. Celle-ci est caractérisée par une précision supérieure à celle des bases de données traditionnellement employées dans des dispositifs de navigation.

Mots-clés : modélisation et classification de conducteurs, planification de trajectoires, assistance au conducteur, fusion de données, localisation d'un véhicule routier.

Abstract

The Navigation Aided Intelligent Cruise Control (NAICC) project : a location-based longitudinal and lateral driver aid system

The present study, carried out in the automotive field, concerns the integration of observation, supervision and control tasks in vehicles. The aim is the development of a driver aid system based on the vehicle location. The NAICC project includes two research activities concerning the longitudinal and lateral control of a car. In the longitudinal part, the system adapts the speed to the driving task. In the lateral part, it corrects the trajectory thanks to a reference path computed on-line. This driver aid system consists of a location module identifying the vehicle on an extended database. Using the determined location and the road characteristics stored in the database, NAICC determines a reference path and the associated speed for a given driving situation.

Precise vehicle location as well as precise environment information are required to perform the control tasks. Data fusion techniques, coupled to a new generation of database, are used to obtain the required precision.

Keywords : driver modelling, continuous curvature path-planning, driver aid system, longitudinal and lateral control of a car, data fusion.