

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL - CLERMONT II
ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Formation Doctorale :
Electronique et systèmes

THESE

Présentée pour obtenir le titre de
DOCTEUR D'UNIVERSITE
Spécialité : Vision pour la Robotique

PAR

Djamel KHADRAOUI
Ingénieur E.N.P.A.

LA COMMANDE REFERENCEE VISION POUR
LE GUIDAGE AUTOMATIQUE DE VEHICULES

soutenue publiquement le 13 décembre 1996 devant le jury :

Messieurs Bernard ESPIAU
Wisama KHALIL
François CHAUMETTE
Jean GALLICE
Philippe MARTINET
Christian THIBAUD

Président-rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Merci...

Je remercie Marc Richetin, Directeur du Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique, et d'Automatique (LASMEA), Unité Mixte de Recherche 6602 du CNRS, et Messieurs Jean Gallice, Michel Dhome et Jean Pierre Derutin, responsables du Groupe Automatique : Vision et Robotique (GRAVIR) pour m'avoir accueilli au laboratoire.

Je tiens à remercier aussi Monsieur Bernard Espiau, Directeur de Recherche à l'INRIA Rhône-Alpes, d'avoir accepté de rapporter et de présider cette thèse, Monsieur Wisama Khallil, Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes d'avoir rapporté cette thèse, ainsi que François Chaumette, chargé de recherche à l'IRISA de Rennes pour avoir accepté d'examiner ce travail ainsi qu'aux très enrichissantes discussions que nous avons eues.

Mes remerciements vont également à Monsieur Jean Gallice, Professeur de l'Université Blaise Pascal (CUST de Clermont-Ferrand) et directeur de cette thèse, pour m'avoir accueilli depuis le DEA, pour m'avoir guidé, orienté grâce à ses remarques et critiques pertinentes, et surtout pour m'avoir apporté sa confiance totale.

Pour m'avoir soutenu tout au long de ce travail passionnant, je veux témoigner toute ma gratitude à M. Philippe Martinet, Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal (CUST de Clermont-Ferrand) et co-responsable de cette thèse. Il n'a pas épargné ses efforts et sa patience pour m'aider durant cette thèse et notamment pendant la phase expérimentale, moment où de multiples problèmes de mise en œuvre apparaissent dont on ne dit mot.

Je voudrais également associer à mes remerciements M. Christian Thibaud, Professeur à l'Université Blaise Pascal (CUST de Clermont-Ferrand), pour l'aide précieuse et inoubliable qu'il m'a prodiguée à la fin de ma thèse et pour avoir accepté de l'examiner.

Je suis très reconnaissant envers le CEMAGREF de Clermont-Ferrand, notamment M. Michel Berducat et M. Christophe Debain, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu donner à notre collaboration scientifique. Je suis surtout touché par leur patience, leur disponibilité et toute l'aide matérielle et autres qu'il m'ont prodigués, afin que je puisse effectuer mes expérimentations.

Je remercie tous les doctorants, les secrétaires, et les permanents du LASMEA pour leur bonne humeur pendant ces années de thèse. Je tiens à remercier plus spécialement François Berry qui n'a pas hésité une seconde à m'aider à faire quelques transparents couleur que j'ai utilisé dans la soutenance de ma thèse.

Enfin, je n'oublie pas celui, qui, de près ou de loin, par sa présence ou en pensée, moralement ou matériellement, a contribué à cet aboutissement.

Résumé

Le travail présenté dans cette thèse entre dans le cadre de la commande référencée vision robuste, associant études théoriques et validations expérimentales. Il aborde le problème du contrôle latéral d'un véhicule autonome dans l'espace image. La démarche proposée est basée sur l'utilisation d'informations visuelles pour une commande en boucle fermée. Elle est consacrée à une approche de l'asservissement visuel basée sur la robustesse des lois de commande en vue de la conduite automatique d'une voiture et d'un engin agricole.

Nous pouvons traduire l'un des objectifs du contrôle latéral d'un véhicule comme étant une minimisation d'une erreur entre la distance séparant la trajectoire actuelle du véhicule et la trajectoire désirée. Pour une telle tâche, un modèle bicyclette cinématique ou dynamique linéarisé à deux degrés de liberté est suffisant. La scène visualisée est représentée dans l'espace image par des primitives géométriques de type droite. Dans le contexte autoroutier, le modèle de route retenue est assimilé à un modèle rigide à trois droites se coupant en un point de fuite. Ces différentes modélisations nous servent pour la synthèse des lois de commande ainsi que pour la simulation du comportement cinématique ou dynamique du véhicule.

La première solution retenue pour résoudre le problème de commande consiste à construire un modèle d'état sous forme d'équations différentielles matricielles du premier ordre. Les variables d'état constituent essentiellement les paramètres relatifs aux informations visuelles de la scène. Grâce à ce modèle, construit dans le plan image de la caméra, nous pouvons élaborer une loi de commande du type retour d'état. Une technique basée sur le placement de pôles, est utilisée dans notre cas. Néanmoins, cette première méthode n'est pas robuste vis-à-vis des incertitudes liées aux paramètres du modèle d'état. Ces incertitudes se traduisent par un mouvement de la caméra (tangage par exemple). Par conséquent, nous faisons intervenir un autre critère, faisant l'objet de la seconde solution, pour le contrôle latéral qui doit permettre un meilleur fonctionnement dans toute la plage de variation des paramètres incertains.

La seconde solution que nous avons adoptée est une approche plus générale, qui consiste à utiliser une technique robuste afin de tenir compte des éventuelles variations des paramètres relatifs au modèle de commande du véhicule. Une technique robuste est une technique attractive pour plusieurs raisons. Un contrôleur unique est utilisé afin d'éliminer toute nécessité d'utilisation d'algorithmes adaptatifs pour régler en permanence les gains. Il garantit aussi une stabilité dans la plage de variation des paramètres. La technique retenue dans notre cas est basée sur l'optimisation d'une norme H^∞ du modèle préalablement établi dans le domaine fréquentiel. Le modèle d'incertitude choisi est de type non structuré additif.

Tout au long de ce travail, les deux préoccupations ont été d'une part de valider nos deux approches de commande sur le plan expérimental et d'autre part de leur donner un aspect de généralité. Pour cela, nous avons traité deux exemples concrets. L'un est dédié au guidage d'un véhicule agricole qui s'insère dans le cadre d'une collaboration avec le CEMAGREF. L'autre exemple est dédié au pilotage d'un véhicule automobile en milieu routier. Ceci intervient suite à des travaux réalisés dans un projet sous contrat avec le constructeur automobile Peugeot S.A. Pour cela, nous avons mis au point une manipulation permettant de tester la conduite automatique à une échelle de laboratoire sur notre site expérimental grâce à un robot cartésien.

Mots clés : Commande Référencée Vision, Automatique, Robot Mobile, Véhicule Automobile et Agricole, Modèle Cinématique et Dynamique, Commande Robuste H^∞ , Caméra, Robot Cartésien.

Abstract

The work presented in this thesis forms part of the robust vision-based control, associating theoretical studies and experimental validations. It lands the problem of lateral control of an autonomous vehicle in the image space. The suggested approach is based on the use of visual informations in a control closed loop. It is devoted to an approach of visual servoing based on the robustness of control laws in view of automatic driving of a car and of an agricultural vehicle.

We could translate one of the objectives of the lateral control of a vehicle as being a minimization of an error between the distance separating the present trajectory of vehicle and the desired trajectory. For such a task, a two degrees of liberty linearized kinematic or dynamic bicycle model is sufficient. The visualized scene is represented in the image space by some geometric primitives of a straight line. In the highways context, the road model retained is assimilated to a rigid model composed by three straight lines cutting in a point. These different modellings are useful for the synthesis of the control laws and for the simulation of kinematic or dynamic behavior of the vehicle.

The first solution retained in order to solve the problem of control consists in establishing a state space model characterized by a first order differential equations. The state variables are essentially composed by the parameters of the visual informations related to the scene. Thanks to this model, built in image plane of the camera, we could elaborate a control law by state feedback. A technique based on a pole assignment design, is used in our case. Nevertheless, this first method is not robust with regard to some uncertainties linked to the parameters of the state model. These uncertainties are related to a camera motion for example (pitching which should be constant). Consequently, we add an other criteria, making the object of the second solution, for the lateral control which should guarantees stability over a wide range of parameters changes.

The second solution we adopted is a more general approach. It consists in the use of robust technique in order to take into account of some possible variations of the parameters related to the control model of the vehicle. A robust technique is an attractive technique for several reasons. An unique controller is used in order to eliminate all necessity of use of adaptive algorithms in order to adjust the gains permanently. It also guaranteed a stability in a wide range of variation of the parameters. The technique retained in our case is based on the optimization of H^∞ norm of the model established in the frequency domain. The controller is designed with the plant uncertainty modeled as unstructured additive perturbations in the frequency domain.

In this work, the two preoccupations were, on one hand to experimentally validate our two control approaches, and on the other hand to give them an aspect of generality. For that, we treated two concrete examples. One example is dedicated to the guidance of an agricultural vehicle, in collaboration with the CEMAGREF. The other example is dedicated to the guidance of an automotive vehicle on a road. This is concerned by a project achieved under contract with the french automotive constructor Peugeot S.A. For that, we realized a manipulation allowing to test the automatic driving at laboratory scale on our experimental site thanks to a cartesian robot.

Keys words : Vision-Based Control, Automatic, Mobile Robot, Automotive and Agricultural Vehicle, Kinematic and Dynamic Model, H^∞ Robust Control, Camera, Cartesian Robot.

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xi
Introduction générale	1
1 Etat de l’art en commande des robots par la vision	9
1.1 Introduction	9
1.2 Commande en robotique mobile	11
1.2.1 Problématique	11
1.2.2 Travaux utilisant des techniques modernes	12
1.2.3 Discussion	18
1.3 Vision en robotique mobile	19
1.3.1 Problématique	19
1.3.2 Utilisation d’une seule caméra	20
1.3.2.1 Vision monochromatique	20
1.3.2.2 Vision couleur	22
1.3.3 Quelques approches pour la vision	23
1.3.3.1 Vision stéréoscopique	23
1.3.3.2 Vision dynamique et active	25
1.3.4 Asservissements visuels	26
1.3.4.1 Asservissement en situation	27
1.3.4.1.1 Asservissement en situation avec bouclage interne	27

1.3.4.1.2	Asservissement en situation sans bouclage interne	28
1.3.4.2	Asservissement dans l'image	29
1.3.4.2.1	Asservissement dans l'image dynamique avec bouclage interne	30
1.3.4.2.2	Asservissement dans l'image sans bouclage interne	30
1.3.5	Discussion	31
1.4	Conclusion	32
2	Modélisation du véhicule	35
2.1	Introduction	35
2.2	Caractérisation d'un véhicule	38
2.2.1	Caractéristiques du contact roues-sol	38
2.2.2	Caractéristiques du pneumatique	38
2.3	Modèle cinématique	41
2.4	Modèle dynamique	43
2.4.1	Equations du mouvement	44
2.4.2	Bilan des forces	47
2.4.2.1	Forces actives	48
2.4.2.2	Forces réactives	50
2.4.3	Modèle du lacet	52
2.5	Validation des modèles en simulation	55
2.6	Conclusion	55
3	Modélisation de l'interaction vision-commande	57
3.1	Introduction	57
3.2	Modélisation de la caméra	59
3.2.1	Transformation perspective	59
3.2.2	Coordonnées homogènes	60
3.3	Torseur d'interaction	61
3.3.1	Paramétrage (a, b)	63
3.3.2	Paramétrage (θ, ρ)	64
3.4	Projection perspective d'une droite	66

3.4.1	Paramétrage (a, b)	68
3.4.2	Paramétrage (θ, ρ)	69
3.5	Modèle de projection à trois droites	69
3.5.1	Modèle à point de fuite	70
3.5.2	Validation du modèle en simulation	72
3.6	Conclusion	75
4	Mise en œuvre de la commande référencée vision	77
4.1	Introduction	77
4.2	Synthèse de la commande dans l'espace d'état	78
4.2.1	Commande cinématique : paramétrage (a, b)	79
4.2.1.1	Modèle avec commande en position δ	79
4.2.1.2	Modèle avec commande en vitesse $\dot{\delta}$	80
4.2.2	Commande cinématique : paramétrage (θ, ρ)	81
4.2.2.1	Elaboration du modèle d'état	82
4.2.2.2	Modèle avec commande en position δ	83
4.2.2.3	Modèle avec commande en vitesse $\dot{\delta}$	85
4.2.3	Commande dynamique	86
4.2.3.1	Modèle dynamique complet	86
4.2.3.2	Modèle simplifié avec commande en δ	88
4.2.3.3	Modèle simplifié avec commande en vitesse	90
4.2.3.4	Modèle simplifié discret avec retard	91
4.3	Synthèse de la commande dans l'espace H^∞	94
4.3.1	Fonction de transfert	95
4.3.2	Synthèse du contrôleur robuste	96
4.4	Conclusion	98
5	Résultats de simulation	99
5.1	Les algorithmes de simulation	99
5.2	Application de la commande cinématique	102
5.2.1	Utilisation du paramétrage (a, b)	102
5.2.2	Utilisation du paramétrage (θ, ρ)	106

5.3	Application de la commande dynamique	109
5.3.1	Utilisation du modèle complet	109
5.3.2	Utilisation du modèle simplifié	110
5.4	Résultats de la commande H^∞	113
5.5	Conclusion	118
6	Résultats expérimentaux	121
6.1	Application à la conduite d'un véhicule agricole	121
6.1.1	Organisation matérielle	122
6.1.1.1	Architecture générale	122
6.1.1.2	Module de traitement d'images	124
6.1.1.3	Protocole de tests	124
6.1.2	Résultats	127
6.1.2.1	Test d'asservissement par la méthode de placement de pôles	127
6.1.2.2	Robustesse vis-à-vis du bruit de mesure	128
6.1.2.3	Robustesse vis-à-vis de la vitesse de déplacement	129
6.1.2.4	Analyse et conclusion	130
6.2	Application à la conduite automatique sur route	131
6.2.1	Organisation matérielle	131
6.2.1.1	Synoptique général	131
6.2.1.2	Système de traitement d'images	133
6.2.1.3	Calibrage du modèle de la route	136
6.2.2	Résultats	137
6.2.2.1	Identification du modèle	138
6.2.2.1.1	Présentation des résultats d'identification:	139
6.2.2.1.2	Analyse et conclusion:	143
6.2.2.2	Commande dans l'espace d'état	144
6.2.2.2.1	Placement de pôles sans intégrateur:	144
6.2.2.2.2	Placement de pôles avec intégrateur:	147
6.2.2.3	Commande dans l'espace H^∞	149
6.3	Conclusion	150

Conclusion générale	153
Annexes	158
A Aspects théoriques sur la commande	159
A.1 Commande dans l'espace d'état	159
A.1.1 Solution des équations d'état	159
A.1.1.1 Equations d'état linéaires continues	159
A.1.1.2 Equations d'état linéaires en commande échantillonnée . .	160
A.1.2 Commande modale	162
A.1.2.1 Placement de pôles par réaction d'état	163
A.1.2.2 Optimisation du placement de pôles	164
A.2 Commande par une approche H^∞	166
A.2.1 Introduction	166
A.2.2 Condition de stabilité robuste	167
A.2.3 Stabilité interne	169
A.2.4 Synthèse du correcteur robuste	171
A.2.5 Systèmes avec pôles à l'origine	172
B Principe et procédure d'identification	173
B.1 Principe	173
B.2 Procédure d'identification	175
C Identification de μ_1 et μ_3	177
C.1 Identification de μ_1 :	177
C.2 Identification de μ_3 :	178
Bibliographie	179

Liste des figures

1.1	Principales fonctions d'une application en robotique mobile.	10
1.2	Structure d'asservissement en situation avec bouclage interne.	27
1.3	Structure d'asservissement en situation sans bouclage interne.	28
1.4	Structure d'asservissement dans l'image avec boucle interne.	30
1.5	Structure d'asservissement dans l'image sans boucle interne.	31
2.1	Forces et moments du pneumatique.	39
2.2	Angle de glissement et force latérale d'une roue.	39
2.3	Les vitesses de glissement roue-sol ($V_{I \in roue/sol}$) d'un point I du pneu. . . .	39
2.4	Repère inertiel et repère du solide fixé au véhicule.	40
2.5	Modèle bicyclette.	42
2.6	Trajectoire curviligne du véhicule entre deux positions S_o et S_f	42
2.7	Modèle cinématique du véhicule.	43
2.8	Séquence de rotations (roulis, tangage et lacet).	46
2.9	Bilan des forces - (a): vue de côté, (b): vue de dessous.	48
2.10	Force latérale sur le pneumatique - α est l'angle de dérive.	50
2.11	Angles de dérive en mouvement de lacet.	50
2.12	Test du modèle cinématique.	56
2.13	Comparaison des modèles cinématique et dynamique sans accélération. . .	56
2.14	Test du modèle dynamique avec accélération.	56
3.1	Modélisation de la caméra avec inversion de l'image.	60
3.2	Modélisation de la caméra sans inversion de l'image.	60
3.3	Projection perspective.	62

3.4	Représentation (θ, ρ) d'une droite 2D.	65
3.5	Projection perspective d'une droite.	66
3.6	Scène routière représentée par trois droites.	70
3.7	Validation du modèle de la route - translation selon l'axe x	73
3.8	Validation du modèle de la route - translation selon l'axe z	73
3.9	Validation du modèle de la route - rotation autour de l'axe x	74
3.10	Validation du modèle de la route - rotation autour de l'axe z	75
4.1	Schéma de commande dans l'espace d'état.	78
4.2	Lieu des racines du modèle cinématique en paramétrage (a, b)	80
4.3	Lieu des racines du modèle cinématique en paramétrage (θ, ρ)	84
4.4	Lieu des racines du modèle dynamique complet.	88
4.5	Lieu des racines du système non corrigé.	90
4.6	Schéma de commande dans l'espace H^∞	94
4.7	$ r(p)/F_o(p) $ en fonction de la fréquence pour $\Delta\alpha = 6$ deg et $\Delta h = 20$ cm.	96
4.8	$ r(p)/F_o(p) $ en fonction de la fréquence pour $\Delta\alpha = 6$ deg et $\Delta h = 0$ cm.	96
5.1	Schéma synoptique du simulateur.	101
5.2	Modèle à point de fuite.	103
5.3	Commande cinématique avec paramétrage (a, b)	103
5.4	Commande cinématique (variation de V et de ω_0).	104
5.5	Commande cinématique en paramétrage (a, b, δ)	105
5.6	Commande cinématique avec bruit sur (a, b, δ)	105
5.7	Commande cinématique d'un véhicule agricole en paramétrage (θ, ρ)	107
5.8	Commande cinématique d'un véhicule agricole à différentes vitesses	108
5.9	Commande cinématique d'un véhicule agricole avec bruit de mesure.	108
5.10	Commande dynamique en paramétrage $(a, \dot{a}, b, \dot{b})$	109
5.11	Commande dynamique avec 5% de bruit sur la mesure de a et b	110
5.12	Commande dynamique avec modèle simplifié et commande en δ	111
5.13	Commande dynamique avec modèle simplifié et bruit sur a et b	111
5.14	Commande dynamique avec modèle simplifié et commande en $\dot{\delta}$	112
5.15	Commande dynamique avec modèle simplifié et commande en $\ddot{\delta}$	112

5.16	Trajectoire du changement de voie sur un échelon de 150 pixels en b	113
5.17	Commande cinématique dans l'espace d'état avec variation de α	114
5.18	Erreur statique en boucle fermée.	114
5.19	Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α	116
5.20	Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α	116
5.21	Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α	116
5.22	Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de h	117
5.23	Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de h	117
5.24	Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de h	117
5.25	Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α et h	118
6.1	Synoptique général de l'architecture.	123
6.2	Vue de dessus de la piste d'essai.	125
6.3	Représentation d'une droite dans l'espace 3D et 2D.	126
6.4	Positions des deux caméras sur l'engin.	126
6.5	Comparaison des résultats de simulation et d'expérimentation.	128
6.6	Test à 4 km/h avec adaptation des paramètres $\xi = 0.9$ et $\omega_0 = 0.14rd/s$	128
6.7	Test à 4 km/h avec introduction d'un bruit de 16 pixels sur ρ	129
6.8	Test à différentes vitesses.	130
6.9	Organisation générale de nos expérimentations.	132
6.10	Environnement de développement.	132
6.11	Système de traitement d'images WINDIS.	134
6.12	Flot de données (principe du suivi visuel).	134
6.13	Synoptique de l'algorithme mis en œuvre.	135
6.14	Réglage des différents paramètres du modèle de route à l'échelle 1 : 10.	136
6.15	Résultats de validation du modèle de route.	137
6.16	La SBPA utilisée pour l'identification.	138
6.17	Estimation du retard à partir de la réponse impulsionnelle - cas de μ_2	139
6.18	Identification de μ_2 - Commande de l'axe de translation en x du robot par la SBPA et mesure de b en pixel.	140
6.19	Modèle sans simplification (cas de μ_2).	141
6.20	Première simplification (cas de μ_2).	142

6.21	Seconde simplification (cas de μ_2).	142
6.22	Seconde simplification avec retard (cas de μ_2).	142
6.23	Structure de commande par placement de pôles - l est utilisé pour fixer la consigne, G est le vecteur gain de commande.	144
6.24	Réponse à un échelon de 100 pixels en b pour différents retards.	145
6.25	Réponse à un échelon de 150 pixels en b - Comparaison des résultats simulés et expérimentaux.	146
6.26	Robustesse vis-à-vis du tangage (retour d'état sans intégrateur).	147
6.27	Placement de pôles avec intégrateur.	148
6.28	Robustesse vis-à-vis du tangage (retour d'état avec intégrateur).	148
6.29	Évolution de $ r(p)/F_o(p) $ en fonction de la fréquence - $\Delta\alpha = 6 \text{ deg}$, $\Delta h = 0 \text{ cm}$	149
6.30	Simulation de la commande robuste - réponse à un échelon de 100 pixels en b pour différentes valeurs de $\alpha = [-3 : -10] \text{ deg}$	151
6.31	Validation expérimentale de la commande robuste - réponse à un échelon de 100 pixels en b pour différentes valeurs de $\alpha = [-3 : -10] \text{ deg}$	152
A.1	Structure de commande d'un système dans l'espace d'état.	162
A.2	Système de correction en boucle fermée.	168
A.3	Configuration générale d'un système en boucle fermée.	169
B.1	Structure ARMAX.	174
B.2	Erreur de sortie pour un mode parallèle.	174
C.1	Identification de μ_1 - Commande de l'axe de translation en x du robot par la SBPA.	177
C.2	Identification de μ_3 - Commande de l'axe de rotation en ψ du robot par la SBPA.	178

Liste des tableaux

5.1	Valeurs des différents paramètres utilisés en simulation.	102
5.2	Valeurs des paramètres utilisés en simulation.	106
6.1	Valeurs des différents paramètres utilisés dans la modélisation.	143
6.2	Comparaison entre les valeurs théoriques et identifiées de μ_i	143
6.3	Identification des différentes constantes de temps τ_i	143

Introduction générale

*One machine can do the work
of a hundred ordinary men,
but no machine can do the work
of the extraordinary man.*
Elbert Hubbard

De nos jours, l'une des préoccupations du monde moderne est de concevoir des machines destinées à soulager l'homme dans divers secteurs d'activité. Ce besoin d'automatisation permettra d'éviter à l'opérateur humain des tâches difficiles, et d'avoir une meilleure rentabilité et qualité du produit. En effet, les développements technologiques, en particulier dans les domaines de l'électronique et de l'informatique, contribuent au bon développement de la *robotique*.

Née au début des années 60, la robotique ne recouvrait presque exclusivement que les robots manipulateurs qui sont en général fixes ou astreints à des déplacements limités d'un poste à un autre d'une chaîne de fabrication. Ces dernières années, l'intérêt pour cette discipline connaît un essor tout à fait exceptionnel. Ainsi, diverses organisations dans le secteur public et privé se sont orientées plus spécialement dans la recherche et le développement d'applications en robotique.

Actuellement, la mobilité et l'autonomie des robots constituent des centres d'intérêts importants de la discipline. Cela s'explique par les applications qu'elle peut apporter dans différents domaines économiques et scientifiques. Ces applications ont pourtant la spécificité de prendre place dans des milieux souvent inconnus (exploration), parfois mal connus car détériorés (interventions dans une centrale nucléaire), modélisés de façon imprécise (cas d'un environnement agricole), dynamiques (circulation routière) ou encore hostiles (robotique militaire ou de surveillance).

Depuis 1970 le monde scientifique et industriel porte des efforts sans cesse croissants sur l'étude et la réalisation d'engins mobiles. Ces derniers sont capables d'effectuer des déplacements sans aucune liaison mécanique avec un point fixe de l'espace dans lequel ils évoluent, d'où le nom de robots mobiles. Nous pouvons considérer que «*robot mobile*» est synonyme de «*véhicule*» puisque ce dernier est composé de la structure matérielle et

mécanique qui permet au robot d'effectuer un déplacement. Cet intérêt nouveau, porté à la robotique mobile, s'explique par les applications qu'elle peut apporter dans de nombreux domaines. Comme les robots manipulateurs, les robots mobiles sont destinés à remplacer ou à soulager l'homme des tâches fatigantes, dangereuses, inaccessibles, ou encore vitales.

Les tâches monotones ou fatigantes qui peuvent être assurées par des robots mobiles se rencontrent dans différents secteurs. Dans l'industrie (métallurgie, automobile, électrique, agro-alimentaire, etc), il s'agit surtout d'applications de transport ou de distribution que ce soit dans les usines, les mines, les hôpitaux ou les ateliers. On peut prendre l'exemple du convoyage dans un milieu souvent encombré et bruyant qui consiste au stockage ou à l'expédition de pièces à l'unité ou palettisées, l'alimentation en pièces de machines-outils, ou le nettoyage automatique du sol. Un exemple concret consiste à développer un prototype de système de transport capable, en milieu hospitalier, de charger et de transporter des plateaux, des médicaments ou des déchets. Le robot mobile doit se déplacer le long des couloirs, utiliser les ascenseurs puis aller jusqu'au but fixé pour, par exemple, déposer des médicaments.

Dans l'agriculture, ces tâches répétitives peuvent être la moisson, la fenaison, le traitement viticole, l'arrachage des asperges. Dans un autre contexte, on peut noter la place de plus en plus importante accordée à la préservation de l'environnement. L'utilisation de la robotique mobile pour diverses tâches telles que l'entretien des forêts, le nettoyage des plages, des bords de mer ou de quais n'est pas à négliger.

Dans le domaine des travaux publics, nous pouvons citer principalement l'exemple du réseau routier qui nécessite de nombreuses interventions d'entretien pour maintenir et garantir des conditions d'utilisation satisfaisantes vis-à-vis des usagers. Une des opérations d'entretien les plus fréquentes consiste à repeindre la signalisation horizontale sur la chaussée. D'autres secteurs tel que le secteur routier (conduite automatique sur route) fournissent également des applications aux robots mobiles. L'exemple phare est celui du projet européen PROMETHEUS¹ qui a pour but une aide à la conduite partielle ou totale apportée à l'utilisation d'une voiture.

Les tâches dangereuses se rencontrent principalement dans deux milieux : terrestres et sous-marins. Dans le milieu terrestre, on peut distinguer l'industrie nucléaire (maintenance et dépannage de centrales nucléaires), l'industrie chimique, les mines, la lutte contre l'incendie. C'est le cas, par exemple, des centrales nucléaires, des complexes pétrochimiques ou sur les lieux d'une catastrophe.

Dans le milieu sous-marin, on peut citer le ramassage d'échantillons rocheux ou de modules métalliques, le carottage du sol, la pose et la réparation des câbles téléphoniques, l'industrie pétrolière (exploitation de puits, pose d'oléoducs). Pour exécuter toutes ces tâches, un robot manipulateur doit être monté sur une partie mobile dotée de roues, de chenilles, de pattes ou de tout autre moyen de locomotion.

Parmi les tâches inaccessibles à l'homme, certaines appartiennent au domaine spatial

1. PROgram for an European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedentedly Safety

et sont réalisées par des véhicules d'exploration de planètes ou de satellites, ou par des satellites artificiels. Dans le cadre des missions de reconnaissance et d'exploitation qu'elles soient spatiales, aériennes, terrestres ou marines, la robotique mobile fut un tremplin pour la concrétisation des sites inconnus et lointains. Le but final est l'exploration semi-automatique des planètes du système solaire, notamment *Mars* avec des robots à roues ou à pattes.

Enfin, un secteur d'application des robots mobiles, peut-être un peu marginal actuellement est l'aide aux handicapés moteurs qui devient de plus en plus utile. On peut concevoir l'automatisation de fauteuils roulants qui, dotés de capteurs, pourraient se déplacer dans des locaux publics ou privés suivant le désir du malade. L'une des applications dans ce domaine consiste à guider des aveugles ou à planifier les déplacements d'une plate-forme supportant le siège d'un handicapé par le biais d'une interface homme/machine adaptée. L'intérêt et l'importance des applications dans ce domaine sont indéniables même si les industriels hésitent encore à s'investir.

Toutes ces applications, réelles ou potentielles, montrent bien l'intérêt que présente la mobilité en robotique. En effet, depuis que les robots mobiles ont commencé à proliférer dans plusieurs domaines, on assiste à des exigences de plus en plus grandes au niveau de leurs performances. Ces exigences demandent d'une part une simplicité d'utilisation et d'autre part des capacités de traitement plus importantes. En conséquence, les progrès dans la compréhension des différents aspects de la robotique mobile sont une condition préalable pour atteindre les performances technologiques attendues. De plus, il s'agit d'un énorme champ d'activité où coopèrent des disciplines scientifiques aussi variées et étendues que l'informatique, l'électronique, l'automatique, la vision, le traitement du signal, la mécanique et les mathématiques.

On comprend alors l'intérêt évident des robots mobiles autonomes, pourvus de moyens de locomotion tous terrains, de capteurs performants et de calculateurs puissants pour le traitement des informations issues des capteurs et de la commande automatique.

Objectifs et cadre de l'étude

Depuis quelques années, l'accroissement de la sécurité routière suscite un grand intérêt de la part des constructeurs automobiles et des laboratoires de recherche qui voient là un défi à relever. Ainsi, des projets voient le jour visant à mettre au point des systèmes, plus ou moins complexes, capables d'effectuer des opérations d'aides au pilotage ou même de pilotage assisté par ordinateur. La société Peugeot S.A.² s'inscrit dans ce contexte puisqu'elle se fixe, entre autres, comme objectif de concevoir des systèmes de conduite automatique pouvant être implantés sur un véhicule afin d'assister le conducteur dans un contexte autoroutier.

Dans un autre contexte, la complexité de la conduite des engins agricoles actuels

2. Société Anonyme

et la fatigue causée au conducteur pour la dureté du travail agricole, ont conduit les constructeurs de machines agricoles ainsi que les centres de recherche à s'investir dans le domaine de l'assistance à la conduite de ces engins. C'est dans cette optique que le CEMAGREF³ inscrit un de ses axes de recherche dans le développement de systèmes d'aide au pilotage d'engins agricoles.

Le développement de systèmes d'aide au pilotage d'un véhicule d'une manière générale peut être conditionné aussi par d'autres critères, tels que les problèmes de coût et de facilité de mise en œuvre. Par conséquent, les choix technologiques doivent rester réalistes pour intéresser les fabricants de véhicules (voitures automobiles ou engins agricoles) ainsi que les utilisateurs.

Dans ce cadre, l'utilisation de la vision artificielle trouve un vaste champ d'applications avec comme capteur principal, la caméra qui est essentielle pour la résolution des problèmes de perception. Sa miniaturisation et les récents développements du traitement de l'image ont permis, non seulement l'installation de la caméra au niveau du véhicule, mais aussi l'intégration des informations visuelles dans la boucle de commande.

Les travaux que nous présentons dans cette thèse, s'inscrivent dans le cadre des recherches menées au sein du groupe GRAVIR (GRoupe Automatique : VIsion et Robotique) du L.A.S.M.E.A. (LABoratoire des Sciences et Matériaux pour l'ELectronique, et d'Automatique) de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, sur le thème de la vision dynamique active pour la robotique. Ainsi, plusieurs projets sont traités dans cet objectif. Nous citons entre autres :

- Modélisation en commande référencée vision, qui permet d'effectuer des asservissements visuels dans le référentiel capteur par régulation d'une fonction d'erreur représentative des écarts entre le motif courant et le motif désiré dans l'image. Ce travail a été expérimenté sur un robot manipulateur en utilisant un capteur actif, constitué d'un couple de diodes laser fixées à proximité d'une caméra [Motyl 92] [Khadraoui 96c].
- Contrôle dynamique latéral d'un véhicule (citroën XM) qui entre dans le cadre d'un projet en collaboration avec Peugeot S.A. et l'I.N.R.I.A.⁴ (centre de Sophia Antipolis). Il consiste à piloter automatiquement un véhicule à partir des informations obtenues par une caméra monochrome. Seul le contrôle latéral du véhicule est réalisé et l'algorithme de vision utilisé [Chapuis 91] permet d'effectuer la localisation 3D du véhicule et de synthétiser ensuite des lois de commande pour le guidage [Jurie 94].
- Asservissement visuel d'un engin agricole (tondeuse, moissonneuse) en collaboration avec le CEMAGREF. Ce système d'autoguidage permet à chaque instant d'optimiser la largeur de coupe dans un champ agricole, réduisant le rôle de l'opérateur à un rôle de surveillance. Il a été mis au point un algorithme de segmentation qui

3. Centre de la recherche pour l'ingénierie de l'agriculture, de l'environnement et de la Forêt

4. Institut National de Recherche en Informatique et Automatique

consiste à partager l'image en deux zones (fauchée et non fauchée) [Derras 93]. Les informations visuelles issues du traitement des images servent à commander l'engin agricole [Debain 96].

Le domaine applicatif dans lequel notre travail s'insère est celui du pilotage de véhicules autonomes (véhicule automobile ou engin agricole) par la mise en œuvre d'asservissements visuels. Il s'agit d'asservir le véhicule par rapport à une référence construite à partir des observations de la scène, fournies par une caméra. Le véhicule possède un seul degré de commande pour le contrôle de l'angle de direction des roues. Comme capteur, une caméra unique permet de percevoir l'environnement. Dans ce contexte, la «*commande référencée vision*» revêt une importance capitale puisque c'est l'un des maillons de base de la chaîne de perception-décision-action.

Ce mémoire de thèse a pour but de présenter notre contribution à l'étude et à la mise en œuvre de lois de commande référencée vision dans le cas spécifique du «*contrôle latéral d'un véhicule*». Le but d'un système de contrôle latéral est de permettre à un véhicule automobile :

- de maintenir sa position centrée sur sa voie de circulation,
- d'effectuer un changement de voie,
- ou de faire une manœuvre d'évitement d'obstacles.

Pour un engin agricole, il s'agit d'un asservissement par rapport à une référence. Pour les engins de récolte, l'interface fauchée/non fauchée constitue une référence.

Les objectifs de cette étude s'articulent autour des motivations suivantes :

(1) Modélisation de la commande référencée vision dans le cas du contrôle latéral d'un robot mobile.

Nous retenons la philosophie de la commande référencée vision appliquée aux robots manipulateurs, qui consiste à intégrer les informations visuelles issues de la caméra directement dans la boucle de régulation. En France, les premiers travaux qui ont marqué ce domaine ont été conduits par *Chaumette*, *Espiau* et *Rives* ([Rives 87] [Chaumette 90] [Espiau 92]). A travers ces études, on s'est aperçu que le principe de ces méthodes est spécifique pour le cas des robots holonomes⁵ et qu'elles ne sont pas transposables directement au cas d'un robot non-holonyme car le nombre de degrés de commande n'est pas égal au nombre de variables de mobilité.

Notre travail consiste à formuler la théorie de la commande référencée vision par une modélisation adaptée au cas général d'un contrôle latéral d'un robot mobile (voiture automobile ou engin agricole). Cette étape nécessaire de modélisation une fois établie, le problème devient alors du ressort de l'automatique.

5. Une contrainte est dite holonome lorsqu'elle est intégrable. Lorsqu'une contrainte n'est pas intégrable, elle est dite non-holonyme.

(2) **Etude de faisabilité par la mise en œuvre des différentes lois de commande.**

Dans cette première phase, nous montrons comment il est possible, à partir de la modélisation cinématique et dynamique du véhicule ainsi que de la scène, de simuler et d'expérimenter au mieux le comportement du système bouclé. L'objectif final est de valider nos modèles sur des expériences réelles que ce soit sur un engin agricole en collaboration avec le CEMAGREF ou sur notre site robotique (robot portique) permettant d'expérimenter le contrôle latéral d'un véhicule automobile.

Nous mettons en évidence les avantages et les limitations du principe de cette première méthode de commande à travers l'expérimentation dans différentes situations.

(3) **Amélioration de la commande permettant de palier les imperfections liées aux variations des paramètres du véhicule.**

En effet, lors d'une accélération ou d'un freinage, les paramètres du modèle varient et l'algorithme de commande le traduit comme un écart anormal du véhicule. Nous montrons comment à partir des imperfections de la première méthode (incertitude des paramètres du modèle), il est possible de s'orienter vers une nouvelle approche. Il s'agit d'une méthode plus générale tenant compte des contraintes liées au domaine d'utilisation et proposant une solution de commande robuste. Compte tenu de la difficulté de mesurer le tangage, le roulis et la hauteur avec une seule caméra, les approches de commande adaptative ont été écartées.

Solutions retenues

Notre travail aborde le problème du contrôle latéral d'un véhicule autonome dans l'espace image. La démarche proposée est basée sur l'utilisation d'informations visuelles pour une commande en boucle fermée. Il importe que, grâce à la caméra, le véhicule soit doté d'une régulation sur l'environnement extérieur. Les différentes solutions retenues pour atteindre nos objectifs sont résumées dans ce qui suit.

Nous pouvons traduire l'un des objectifs du contrôle latéral d'un véhicule comme étant une minimisation d'une erreur entre la distance séparant la trajectoire actuelle du véhicule et la trajectoire désirée. Pour une telle tâche, un modèle bicyclette cinématique ou dynamique linéarisé à deux degrés de liberté est suffisant. La scène visualisée est représentée dans l'espace image par des primitives géométriques de type droite. Dans le contexte autoroutier, le modèle de route retenue est assimilé à un modèle rigide à trois droites se coupant en un point de fuite. Ces différentes modélisations nous serviront pour la synthèse des lois de commande ainsi que pour la simulation du comportement cinématique ou dynamique du véhicule.

La première solution retenue pour résoudre le problème de commande consiste à construire un modèle d'état sous forme d'équations différentielles matricielles du premier ordre. Les variables d'état constituent essentiellement les paramètres relatifs aux informa-

tions visuelles de la scène. Grâce à ce modèle, construit dans le plan image de la caméra, nous pouvons élaborer une loi de commande du type retour d'état. Une technique basée sur le placement de pôles est utilisée dans notre cas. Néanmoins, cette première méthode n'est pas robuste vis-à-vis des incertitudes liées aux paramètres du modèle d'état. Ces incertitudes peuvent se traduire par un mouvement de la caméra (tangage par exemple). Par conséquent, nous faisons intervenir un autre critère pour le contrôle latéral qui doit permettre de fonctionner correctement dans toute la plage de variation de ces paramètres.

La seconde solution que nous avons adoptée est une approche plus générale, qui consiste à utiliser une technique robuste afin de tenir compte des éventuelles variations des paramètres relatifs au modèle de commande du véhicule. Une technique robuste est une technique attractive pour plusieurs raisons. Un contrôleur unique est utilisé afin d'éliminer toute nécessité d'utilisation d'algorithmes adaptatifs pour régler en permanence les gains. Il garantit aussi une stabilité dans la plage de variation des paramètres. La technique retenue dans notre cas est basée sur l'optimisation d'une norme H^∞ du modèle préalablement établi dans le domaine fréquentiel. Le modèle d'incertitude choisi est de type non structuré additif.

Cet ouvrage

Ce document est organisé en six chapitres. Le chapitre 1 présente un état de l'art en ce qui concerne la commande des robots par la vision. La commande est abordée en exposant les principales techniques ainsi que les différents travaux portant sur le contrôle latéral d'un véhicule. Dans la partie vision, des techniques de vision sont rassemblées en faisant un point sur les réalisations menées dans différents laboratoires.

Le chapitre 2 sera consacré à la modélisation du véhicule mobile. Celle-ci est validée dans ses aspects dynamiques pour le cas d'une voiture automobile, et ses aspects cinématiques dans le cas général d'un robot mobile.

Le chapitre 3 est consacré aux différents types de modélisation de la scène permettant de réaliser la tâche d'asservissement visuel.

La mise en œuvre de la commande référencée vision pour le contrôle latéral d'un véhicule est détaillée dans le chapitre 4. Nous présentons les différentes lois de commande étudiées et l'ensemble des résultats de simulation au chapitre 5. Les résultats expérimentaux sont exposés au chapitre 6 et concernent d'une part les tests effectués sur une moissonneuse-batteuse, et d'autre part ceux validés sur notre site expérimental.

Chapitre 1

Etat de l'art en commande des robots par la vision

*The artist is one who gives
form to difficult visions.*

Theodore Gill

A vant d'entreprendre l'étude et la mise en œuvre de la commande référencée vision pour le contrôle latéral d'un véhicule, il est indispensable de faire un état de l'art sur les travaux connexes à ce sujet. On aborde plus précisément dans une première partie de ce chapitre l'aspect commande en robotique mobile avec les problèmes qu'elle soulève ainsi que les différentes approches utilisées. Dans une seconde partie, nous présentons les aspects liés à la perception, plus particulièrement les différentes techniques de vision appliquées.

1.1 Introduction

Un robot mobile autonome est un système doté de moyens de perception de son environnement partiellement ou totalement inconnu. Il est capable de prendre des décisions pour accomplir une tâche donnée sans intervention humaine. Nous pouvons mettre en évidence les principales fonctions qui interviennent dans une application bâtie autour d'un robot mobile comme montré sur le schéma de la figure 1.1.

Afin d'adapter son comportement à son environnement et aux variations de celui-ci, on s'oriente de plus en plus vers des techniques de perception utilisant la vision. On analyse des scènes plus complexes et les informations visuelles sont extraites à des fréquences élevées. Cette capacité de traitement est apportée par la mise en œuvre d'architectures

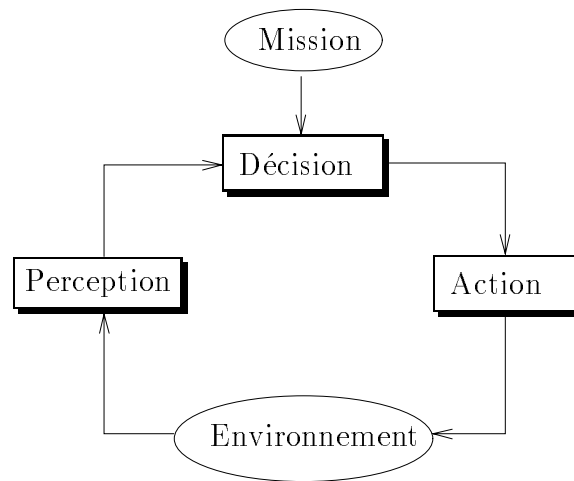


FIGURE 1.1 – *Principales fonctions d'une application en robotique mobile.*

parallèles ou dédiées, et elle permet d'informer très rapidement le module de commande des robots sur leur environnement.

La vision en robotique mobile est définie comme l'ensemble des techniques informatiques appliquées sur des images [Fargeon 93]. Son objectif est l'autonomie de mobilité dans un environnement inconnu et/ou évolutif. La contrainte qui lui est liée est la méconnaissance préalable de l'environnement et de son évolution, sauf si le robot possède une cartographie de celui-ci. L'autonomie recherchée peut être motivée dans le but d'alléger la charge des opérateurs installés sur un véhicule automobile par exemple. Elle peut être aussi utile pour contourner les limitations liées à la transmission large bande vidéo indispensable en téléopération.

En comparaison aux autres domaines applicatifs du traitement d'images (contrôle industriel, télédétection, analyse médicale), celui de la robotique mobile d'extérieur se heurte aussi à différentes difficultés. En effet, l'environnement dans lequel il évolue est variable, l'éclairage est naturel, le traitement doit être embarqué et le temps de réaction doit être le plus bref possible, surtout à grande vitesse. En outre, il convient de faire un choix judicieux du contrôleur permettant de satisfaire les objectifs de la tâche à réaliser. Dans ce dernier cas, certaines questions peuvent être posées :

- quelles sont les informations visuelles utiles pour la commande ?
- comment interpréter ces informations efficacement ?

Du point de vue de l'automatique, des questions supplémentaires se posent en fonction

du type de robot mobile à commander. En effet, on peut distinguer les véhicules ayant une mobilité complète en position et en orientation (chariot de supermarché par exemple) et les véhicules dont la mobilité est restreinte (nombre de degrés de mobilité inférieur ou égal à deux). Parmi ces derniers, on distingue : les véhicules de laboratoire de type uni-cycle à deux roues motrices indépendantes sur un même axe, les voitures, les camions tirant une ou plusieurs remorques et les chars militaires.

Le type de modèle de robot mobile qui nous intéresse est celui d'un véhicule terrestre à quatre roues dont deux sont directrices et deux sont motrices. Généralement, celui-ci est soumis à des contraintes mécaniques spécifiques. Celles-ci limitent les possibilités de mouvement en définissant des liaisons par l'étude du paramétrage du système mécanique. Dans le cas d'un robot mobile, les relations de liaisons font alors intervenir les vitesses généralisées. Ces liaisons sont dénommées liaisons non-holonomes dont la définition est la suivante.

Définition [Tournassoud 92] : *On dit qu'une contrainte scalaire $f(p, \dot{p}) = 0$ est non-holonyme si cette équation est non-intégrable, c'est-à-dire que l'on ne peut pas éliminer tous les termes d'ordre un (termes en $\dot{p}$).*

L'existence de ces liaisons non-holonomes pose des problèmes difficiles au niveau de la commande. En effet, pour une configuration donnée, il existe certaines directions dans lesquelles le véhicule ne pourra pas se déplacer de façon instantanée. Pour une voiture, certaines configurations sont atteintes par le biais de manœuvres (exemple du créneau).

Nous allons maintenant évoquer la problématique de la commande en robotique mobile ainsi que les différentes techniques permettant de synthétiser un correcteur.

1.2 Commande en robotique mobile

1.2.1 Problématique

Nous pouvons identifier en robotique mobile les modes de fonctionnement suivants :

- le mode télécommande dans lequel un opérateur se situe quelque part dans la boucle de commande,
- le mode par apprentissage dans lequel un chemin enregistré est répété ensuite par le véhicule,
- le mode autonome où le robot essaie de réaliser un comportement réactif comme l'évitement d'obstacles.

Ce dernier mode est intéressant, si l'on considère les différentes tâches à résoudre pour y parvenir. En effet, il nécessite les mêmes outils que les deux premiers modes (capteurs,

algorithmes, génération de trajectoires) sauf que les algorithmes associés sont plus ou moins complexes.

Ce n'est que très récemment que l'on s'est intéressé aux problèmes de la commande des robots mobiles. Cet intérêt a suscité de nombreuses études sur des lois de commande en tenant compte des contraintes auxquelles les robots mobiles sont soumis. La commande recherchée dans ces cas est une commande dans l'espace cartésien, ce qui revient à faire atteindre au robot une pose (position, orientation) quelle que soit sa pose initiale. L'une des tâches envisageables pour un véhicule est la tâche de positionnement relatif de celui-ci par rapport à un chemin (autoroute par exemple) ou une courbe qu'il doit idéalement suivre. Une autre tâche sur laquelle beaucoup de chercheurs se penchent actuellement est la stabilisation en un point. Elle correspond à une convergence asymptotique vers une posture désirée, comme l'illustre l'exemple du créneau pour un robot mobile non-holonyme (voir [Samson 93]). En effet, le problème de la commande dans l'espace cartésien peut être abordé de deux manières différentes que nous résumons dans ce qui suit.

Une première approche de *stabilisation par retour d'état autour d'une posture désirée* qui consiste à faire converger le robot vers une posture désirée à partir de n'importe quelle posture initiale. Dans tous les travaux concernant ce problème ([Pissard-Gibollet 93], [Tournassoud 92], [Ait-Abderahim 93] et [Samson 90b]), il a été montré que dans le cas des robots mobiles non-holonomes, il n'existe pas de retour d'état continu capable de stabiliser le robot autour d'une posture désirée (voir théorème dû à *Brockett* dans [Brockett 83]). Des solutions de substitution au retour d'état continu ont été proposées telles que : l'utilisation de retour d'état discontinu [Sordalen 93], ou l'utilisation d'un retour d'état instationnaire [Samson 91a], [Pomet 93].

Une seconde approche par *suivi de mouvement de référence par retour d'état* qui revient à générer un mouvement de référence afin de relier la posture initiale du robot à la posture désirée. Dans ce cas, la loi de commande doit permettre de faire suivre au robot le mouvement de référence. En effet, cette approche est affectée par l'inexistence de solution dans le cas de la stabilisation autour d'une posture désirée. Cela se comprend intuitivement à chaque fois que le mouvement de référence est en mode statique, puisque l'on retombe dans le premier cas. Par conséquent, les lois de commande qui résoudraient le problème de suivi de mouvement ne sont valables et stabilisatrices que lorsque la vitesse du mouvement de référence est non nulle.

Nous allons maintenant présenter quelques travaux concernant le contrôle latéral d'un véhicule utilisant, entre autres, le concept d'autoroutes automatisées, initialement introduit par *General Motors* [Fenton 91].

1.2.2 Travaux utilisant des techniques modernes

Les premiers efforts sur la recherche dans ce domaine ont été conduits dès 1958 dans [Zworykin 58]. Le contrôle latéral a été à l'époque achevé en suivant un câble électrique enterré au centre de la voie (principe du filoguidage). Le système sensoriel est composé

de deux bobines installées à l'avant du véhicule pour détecter le champ magnétique créé par le courant alternatif qui circule le long de l'installation électrique. L'algorithme de commande utilisé dans ces tests permet au véhicule d'avancer en régime permanent le long du câble sans oscillations. L'évolution des algorithmes de commande ont permis ensuite de développer des lois de commande dépendant de la vitesse.

D'autres travaux ont été conduits sur le contrôle latéral du véhicule à l'université d'Ohio (OSU¹) entre 1964 et 1980. Différents modèles de commande ont été générés pour le contrôle latéral. Le modèle dit OSU, rappelé dans [Fenton 91], était le plus évolué. Le modèle en question n'est rien d'autre qu'un modèle bicyclette à deux degrés de liberté avec un terme de correction du roulis [Fenton 91], [Olson 69], [Fenton 76].

Ensuite, le système de suivi électrique a été amélioré par l'utilisation de deux bobines afin d'éliminer les problèmes qui causent certaines oscillations lors de l'utilisation d'une seule bobine. Les différents tests effectués n'ont pas donné de bons résultats pour des vitesses supérieures à 30 km/h. Une commande compensatrice a été essayée en vue d'améliorer le comportement du système à grande vitesse [Fenton 68].

Vers 1970, le même modèle OSU est réutilisé avec une théorie de commande classique pour la synthèse du contrôleur [Fenton 76]. Deux asservissements ont été examinés dans ce cas. Le premier utilise un retour unique sur l'erreur latérale. Le second emploie deux retours, l'un sur l'erreur latérale et l'autre sur l'angle de tangage-lacet. La synthèse du contrôleur avec un retour sur l'erreur latérale a été réalisée sur la base d'un critère de réglage temporel. L'analyse du simple compensateur est faite par la technique des lieux des racines [Fenton 76]. Les performances du double compensateur ont été évaluées expérimentalement et elles ont donné de bons résultats à faible vitesse. Néanmoins, le problème majeur subsiste sur l'obtention d'une bonne estimation de l'angle de lacet-tangage. Ces lois de commande à gains fixes présentent des divergences notables dès que la vitesse augmente. Dans le but de résoudre ce problème, des gains adaptatifs vis-à-vis de la vitesse ont été utilisés [Cormier 80]. Des techniques de lieu des racines ont été employées afin d'évaluer les performances du contrôleur adaptatif.

Des travaux similaires ont été réalisés dans [Ito 73] avec une commande automatique de la direction, du freinage et d'accélération du véhicule. Une seule ligne électrique, excitée à 1200 Hz, est utilisée comme ligne de référence sur la voie. La détermination de la position du véhicule s'effectue par une mesure de l'amplitude du signal. La loi de commande est représentée par un contrôleur P.D.

Dans le même contexte, les chercheurs se sont orientées vers l'application de techniques de commande moderne dont quelques travaux sont abordés dans les paragraphes suivants.

La théorie de la commande moderne, incluant les approches d'état et de commande optimale, a été appliquée depuis 1971. Cependant, l'inadéquation de la technologie des capteurs de l'époque n'a pas permis des implantations pratiques jusqu'à ces dernières années. En effet, les techniques de commande classiques ainsi que les méthodes fréquen-

1. Ohio State University

tielles, qui sont plus orientées vers l'analyse des fonctions de transfert d'entrée/sortie, restent dominantes dans la plupart des implantations pratiques.

En 1974, *Boderson* propose une commande optimale avec un indice de performance quadratique qui pénalise le déplacement latéral, l'accélération latérale et l'accélération en lacet [Boderson 74]. Vers le milieu des années 1970, *Daimler Benz* a conduit des travaux de recherche sur le contrôle latéral d'un autobus où des méthodes dans l'espace d'état ont été appliquées ([Christ 77], [Darenberg 78]). Une approche LQR a été suggérée à cause des limitations des performances d'une simple loi de commande de type proportionnel. Une tentative a été faite dans le but d'obtenir un contrôleur optimal fixe et performant dans la plage de variation des paramètres. Finalement, ces commandes n'étaient pas très performantes et une synthèse de commande par un placement de pôles a été retenue.

Au milieu des années 1980, un contrôleur optimal a été développé à l'université d'Ohio (OSU) [Fenton 88]. Il est synthétisé en choisissant une matrice de pondération comme une fonction de coût et la résolution d'une équation algébrique de Riccati. Le modèle dynamique utilisé est une fonction de transfert du quatrième ordre. L'équation de Riccati a été résolue pour différentes vitesses allant de 10 m/s à 35 m/s. Du fait que les variables d'état ne soient pas toutes accessibles, un observateur a été employé afin d'estimer les nouvelles variables d'états. D'un autre côté, si un filtre de *Kalman* est considéré en conjonction avec un méthode LTR, quelques propriétés de robustesse peuvent être garanties au système pour des vitesses fixes. En effet, aucune propriété de robustesse ne peut être garantie pour l'approche optimale considérée.

Une méthode LQR a été présentée dans [Shladover 78] en utilisant un filtre de *Kalman*. Du fait de la complexité de la synthèse du filtre en question, un modèle réduit à deux états, composé de la position latérale et de l'angle de lacet, a été employé. Une loi de commande simple est implantée en évaluant ses performances dans les conditions nominales. D'autres résultats ont été discutés sur l'influence des variations de la vitesse sur les gains de commande et les répercussions sur le confort du passager. Il a été remarqué que dans le cas d'un simple contrôleur proportionnel, les performances d'une telle commande sont dégradées au fur et à mesure que la vitesse croît.

Les travaux de *Mitsubishi Motors Corporation* [Hayafune 90] présentent une stratégie de commande pour le contrôle latéral d'un véhicule sur une autoroute à plusieurs voies. Le concept de la commande est réalisé pour obtenir une compatibilité entre le confort du passager et la commandabilité du véhicule lors d'un changement de voie ou d'un évitement d'obstacles. La stratégie de commande est empirique et se base sur des essais expérimentaux. L'objectif de ces essais, effectués par un conducteur humain, est de déterminer les conditions de confort du passager. La mesure de la position latérale du véhicule peut être faite par différents types de capteurs : un capteur de type magnétique, un système de mesure laser ou une caméra vidéo. La fonction de transfert liant la position latérale du véhicule et l'angle de commande des roues est modélisée par un système de second ordre dont les paramètres sont identifiés. Un régulateur de type proportionnel est synthétisé à partir de courbes des résultats expérimentaux qui traduisent les conditions de confort

du passager lors d'un changement de voie normal (dépassement de véhicule) ou rapide (évitement d'obstacles). Cette méthode de commande est certes proche du comportement d'un conducteur humain, par contre elle présente l'inconvénient d'être dédiée pour un type de véhicule bien précis. Les expériences sont effectuées dans les conditions réelles sur un prototype pour des vitesses allant jusqu'à 100 km/h.

Dans le cadre du programme PATH², une commande non-linéaire pour le contrôle latérale et longitudinale est proposée dans [Sheikholeslam 92]. Il a été élaboré un modèle non-linéaire qui tient compte de la dynamique latérale et longitudinale et de même la dynamique de l'actionneur de la direction. La loi de commande proposée est issue de la théorie non-linéaire. Elle est utilisée afin d'éliminer les non-linéarités et elle permet de placer les pôles du système linéarisé. Néanmoins, la robustesse du système est affectée par les conditions de linéarisation qui ne sont pas toujours vérifiées. La loi de commande est simulée sur un convoi de cinq voitures accélérant sur une portion de route courbée. Les recherches continuent dans ce cadre afin d'étudier la robustesse de la commande vis-à-vis du bruit de mesure ainsi que des retards de communication entre les véhicules.

Des études théoriques et expérimentales sur le contrôle latéral d'un véhicule sur autoroute sont présentées dans [Peng 92] à l'université de Californie à Berkeley. Deux algorithmes de commande ont été testés : un simple contrôleur P.I.D. servant de base et un contrôleur optimal développé pour améliorer les performances du suivi ainsi que la robustesse du système. Un accéléromètre latéral, quatre magnétomètres, un capteur de lacet et un capteur de direction au niveau des roues avant ont été installés sur un véhicule expérimental de type *Toyota Celica*. Ces informations sont exploitées par un système informatique doté d'un microprocesseur TMS320C30 pour générer la commande d'un actionneur de direction hydraulique. Les résultats montrent que la commande optimale à réduction de sensibilité est robuste vis-à-vis de variation des paramètres du modèle du véhicule (pression des pneus, charge dans la voiture, bruit sur les mesures) pour une vitesse maximale de 40 km/h.

Le projet mené par le L.A.S.M.E.A. en collaboration avec P.S.A. et l'I.N.R.I.A. (centre de Sophia Antipolis) consiste à piloter automatiquement un véhicule à partir des informations visuelles obtenues par une caméra monochrome située au niveau du rétroviseur [Jurie 92]. L'algorithme de vision consiste à suivre des lignes blanches et de localiser le véhicule sur la chaussée. Seul le contrôle latéral sur une voie de circulation est réalisé avec succès pour des vitesses allant jusqu'à 130 km/h. La loi de commande est synthétisée dans l'espace d'état par une méthode de placement des pôles. Les variables d'état du modèle représentent les paramètres de localisation du véhicule, à savoir, sa position et son orientation. Il a été mis en évidence des avantages sur la rapidité et la simplicité d'intégration ainsi que sur la précision des informations 3D. Les limites d'une telle approche sont liées aux pertes de suivi de la route lorsque les contraintes géométriques ne sont pas respectées, à la difficulté de mesurer le tangage et le roulis. Ainsi, lors d'un freinage ou d'une accélération, l'algorithme le traduit par un écart anormal du véhicule.

2. Program for Advanced Technology for the Highway

Dans [Murphy 94], un modèle du véhicule et de suivi de trajectoire est développé au NIST³ aux USA. Ce travail consiste dans l'examen de la stabilité du système vis-à-vis de la vitesse et du retard causé par les différents traitements. Il s'agit de guider un véhicule automobile sur autoroute en suivant la ligne blanche de celle-ci grâce à l'utilisation d'une caméra. Seul le modèle latéral du véhicule est pris en compte pour synthétiser une commande classique (lieu des racines et tracé de *Bode*), en considérant des gains obtenus en générant une trajectoire de référence à suivre. Ces gains dépendent de la vitesse et tiennent aussi compte du retard causé par le système de traitement d'images. Dans [Murphy 93], on trouve une présentation des différents systèmes embarqués dans le cadre des applications du NIST. Un système de commande temps réel est utilisé pour des véhicules militaires et civiles. Dans le cas des applications militaires, on distingue deux modes opératoires : un mode téléopéré et un mode semi-autonome utilisant un système de navigation inertielle afin de suivre un chemin pré-enregistré. Dans le cas d'applications civiles, le système de vision remplace l'opérateur humain afin de guider le véhicule par un asservissement visuel.

Beaucoup d'applications ont été menées dans le cadre de la théorie de la commande robuste. On peut citer une application liée à la commande d'un véhicule basée sur la synthèse d'une loi temporelle discrète et robuste [Tan 89]. La robustesse est relative à la dynamique du véhicule due aux phénomènes de patinage et de dérapage en cas de freinage et d'accélération. C'est une loi de commande linéaire en boucle fermée appliquée à un système linéarisé et tenant compte d'une large bande de variation des paramètres du modèle. Ces paramètres sont détectés au niveau du système de freinage et sont difficiles à mesurer avec précision. La loi de commande, à gains constants, est validée en réel sur des expérimentations de freinage anti-dérapage. Les résultats des tests de l'algorithme de commande montrent une bonne performance en regard de l'environnement du véhicule. L'inconvénient d'une telle loi de commande réside dans la nécessité de mesurer en permanence la vitesse du véhicule.

Le travail de *Byrne* [Byrne 94] est intéressant pour la synthèse d'une commande robuste appliquée à la dynamique latérale d'un véhicule automobile. La commande est élaborée dans le but de garantir la stabilité et le confort du véhicule vis-à-vis des variations des paramètres du modèle dynamique auxquelles est soumis le véhicule en mouvement sur une route. Ces paramètres sont : la vitesse longitudinale, la masse, l'inertie, ainsi que les coefficients de frottement des roues. Cette commande est synthétisée en utilisant une approche par fonction de transfert dans le domaine fréquentiel. Une bande d'incertitude dans le domaine fréquentiel est déterminée par des simulations à travers une marge de variation permise des paramètres du modèle. Finalement, la loi de commande est dégagée et évaluée en simulation en résolvant le problème d'interpolation de *Nevanlinna-Pick* détaillé dans [Dorato 92].

La logique floue a aussi été appliquée au problème du contrôle latéral d'un véhicule dans le cadre du programme PATH [Hessburg 94]. Elle est utilisée pour développer les règles de base pour le retour d'état et pour la fixation des gains. Ensuite, le contrôleur

3. National Institute of Standards and Technology

floue a été testé sur une *Toyota Celica* pour des vitesses allant de 30 km/h à 60 km/h. On note les bonnes performances d'une telle commande qui permet de maintenir une erreur latérale inférieure à 10 cm pour des vitesses allant jusqu'à 50 km/h.

Dans [Niehaus 94], on trouve une étude de la faisabilité du guidage d'un véhicule automobile sur des autoroutes à accès limité. L'approche est basée sur l'utilisation de règles (rule based). Les entrées du système sont les paramètres décrivant la situation du trafic, la géométrie de la route, l'état du véhicule et l'objectif du conducteur. Les sorties constituent les paramètres de guidage qui commandent la logique de contrôle, à savoir l'accélération, la direction et le freinage. Ce travail tient compte d'un environnement réaliste de la route qui contient des incertitudes sur les paramètres d'entrée. Une méthodologie stochastique est présentée afin de manipuler plus facilement les informations du système.

Dans le cas du suivi de droite flou par un robot mobile [Pons 94], la comparaison par rapport aux autres méthodes classiques a donné un meilleur temps de réponse en faveur de la méthode floue. Les performances d'une telle méthode dépendent fortement de l'application en question. Dans le cas de la commande floue, ces performances relèvent surtout du nombre de règles mises en jeu par le contrôleur. En effet, une explosion combinatoire des règles peut rendre le temps de réponse peu compétitif par rapport à une commande par retour d'état classique.

Des mises en œuvre de commandes neuronales par rétro-propagation indirecte, appliquées à la robotique mobile, sont détaillées dans [Henaff 94]. La méthode neuronale auto-adaptative est mise en avant comme une solution permettant d'éviter l'utilisation d'un modèle géométrique inverse du robot ou d'un modèle comportemental de référence. Des expérimentations ont été faites sur le robot mobile ROMEO [De Laplace 91] et sur un robot bipède du L.R.P.⁴ [Takanishi 88].

Dans le cadre d'une application agricole, trois lois de commandes ont été testées sur une moissonneuse-batteuse [Khadraoui 96b] dont l'une d'elles est basée sur les réseaux de neurones. Cela consiste à contrôler le mouvement latéral du véhicule sur un champ agricole. Ce mouvement est effectué en suivant une droite symbolisant une ligne fauchée et non fauchée détectée dans l'image. Dans ce travail, un réseau multi-couches et un algorithme de rétro-propagation du gradient ont été adoptés. L'implantation informatique de ce type de réseau à structure régulière est relativement aisée. Un réseau à deux entrées (écart et cap de la ligne détectée dans l'image), une sortie (consigne de braquage) et deux couches de deux et cinq neurones ont été employées. Le réseau apprend les exemples de la base d'apprentissage dont le contenu est élaboré par le modèle que constitue le superviseur humain. Pour créer la base d'apprentissage, une piste composée de deux lignes droites et d'une courbe a été dessinée sur le sol. Durant cette phase d'apprentissage en conduite manuelle, on enregistre l'écart et le cap de la ligne détectée dans l'image ainsi que l'angle de roue correspondant. La base de données issue de l'apprentissage est utilisée pour réaliser la convergence du réseau. Cet apprentissage n'est pas réalisé «en ligne» car l'utilisation de séries échantillonnées avec l'algorithme de rétro-propagation du gradient peut conduire

4. Laboratoire de Robotique de Paris

facilement à l'apparition de minima locaux.

1.2.3 Discussion

Dans le cas du contrôle latéral d'un véhicule, la synthèse d'une loi de commande est soumise à des exigences telles que :

- une minimisation de l'erreur latérale,
- un fonctionnement sur une large bande de variation des paramètres (vitesse, masse, coefficient de raideur des pneus),
- un bon confort dans la conduite,
- une robustesse vis-à-vis des erreurs dues à la modélisation du capteur (paramètres intrinsèques), de l'interaction scène/capteur (paramètres extrinsèques), et de l'actionneur.

A travers les différents travaux cités, on s'aperçoit que des problèmes ouverts restent posés pour le cas du contrôle latéral d'un véhicule. Ces difficultés sont liées aux points suivants :

- problèmes des non-linéarités,
- variation temporelle des paramètres,
- quelques paramètres sont difficiles à mesurer (vitesse latérale, tangage, roulis, coefficient de raideur des pneus).

Des méthodes adaptatives peuvent être utilisées pour des systèmes variant dans le temps. Néanmoins, ces méthodes ne garantissent pas les mêmes performances lorsque le système est en cours d'adaptation et elles conduisent en général à des oscillations. Par ailleurs, si l'actionneur de direction du véhicule est saturé, des instabilités sont induites. Encore faut-il pouvoir estimer ou mesurer ces paramètres avec fiabilité.

En conclusion, on peut dire que même s'il y a eu un nombre significatif de travaux de recherche sur le contrôle d'un véhicule pendant ces 40 dernières années, la solution «*idéale*» n'existe pas encore. En effet, plusieurs critères peuvent être dégagés quant au principe de commande d'un robot mobile. Le choix peut être effectué, soit sur une approche modélisante si le modèle existe et s'il est fidèle au comportement du véhicule, soit sur une approche sans modèle s'il est difficile d'obtenir un modèle adéquat de son comportement. Ensuite, il importe de décider sur la manière de récupérer les informations de l'environnement en choisissant un capteur et un système de traitement informatique adéquats.

Dans le cas où l'on utilise la vision comme moyen de perception, le choix du capteur ainsi que de la technique à mettre en œuvre est important. C'est ce que nous allons présenter dans la section suivante en donnant quelques projets de vision en robotique mobile.

1.3 Vision en robotique mobile

1.3.1 Problématique

Le rôle des capteurs extéroceptifs qui équipent un robot mobile est généralement double. Une fois l'information acquise, ils doivent assurer la perception de l'environnement et la localisation du robot dans cet environnement. La perception est la possibilité d'interpréter l'environnement proche ou éloigné du robot. Elle est nécessaire pour la sécurité du robot, pour la modélisation de l'environnement et pour sa localisation relativement à cet environnement. L'étape de localisation permet de se positionner par rapport à un environnement connu d'avance.

Briot a classé les systèmes de perception rencontrés en robotique en trois types. On cite [Briot 91] :

- la perception sonore dont les buts principaux sont d'une part la communication vocale avec les robots et d'autre part la proximétrie par ultrasons,
- la perception tactile qui sert par exemple pour l'identification et la localisation d'objets,
- enfin, la perception optique est utilisée principalement dans deux domaines : la proximétrie et surtout la vision.

Parmi les différentes techniques de perception, la vision s'est affirmée d'emblée comme un domaine privilégié. Les avantages de l'utilisation de la vision sont nombreux :

- richesse du contenu de l'information,
- structuration de l'information,
- l'image de la caméra peut aussi donner une information de la scène 3D (conservation de certaines relations topologiques).

Trois grandes classes de capteurs apparaissent chez les utilisateurs : la vision utilisant une, deux ou trois caméras passives, les capteurs semi-actifs à lumière structurée, et la vision basée sur les télémètres imageurs. On parle de caméra lorsque l'image obtenue du capteur n'est plus celle d'un point ou de quelques points, mais celle d'une surface.

L'élément sensible d'une caméra est divisé en abscisse et ordonnée en un certain nombre de points appelés *pixels*.

Etant donnée l'importance de l'enjeu de l'autonomie de mobilité, la vision a constitué très tôt une des branches de recherche les plus prolifiques en robotique mobile. Un système de vision en robotique mobile est susceptible de remplir diverses tâches telles que :

- détection, localisation et suivi de route structurée ou non structurée,
- reconnaissance des zones carrossables en terrain non structuré, c'est-à-dire la construction d'un modèle 3D et l'évaluation de la nature du terrain,
- traitement des obstacles fixes et mobiles,
- recalage de la position sur des amers comme les objets cartographiés propres à la route (intersections).

Nous allons énoncer brièvement, dans les paragraphes suivants, les différentes méthodes au service de la vision en les classifiant selon le capteur ou la technique utilisée.

1.3.2 Utilisation d'une seule caméra

Nous abordons dans cette section quelques travaux selon le type de caméra employé, monochrome ou couleur.

1.3.2.1 Vision monochromatique

Dans cette classe, il s'agit d'un système de vision qui n'utilise qu'une seule caméra monochrome. Nous l'illustrons principalement par la présentation de quelques travaux réalisés pour la conduite automatique d'un véhicule.

On peut citer principalement les travaux concernant la détection de la signalisation horizontale en temps réel vidéo (40 ms) pour le suivi de route [Chapuis 91], [Chapuis 95] et la surveillance de trajectoire [Potelle 96]. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un contrat de recherche entre le L.A.S.M.E.A. et le constructeur automobile Peugeot S.A. Deux méthodes ont été mises en œuvre et utilisent les données provenant d'une caméra CCD monochrome. Le système de vision est embarqué sur une voiture de tourisme de type Citroën XM se déplaçant sur une autoroute. Le principe des deux méthodes est basé sur l'utilisation de la géométrie normalisée de la route.

La première méthode, appelée méthode lignes, permet de calculer en temps réel la position latérale du véhicule par rapport aux bandes blanches de la route. L'algorithme analyse environ neuf lignes horizontales afin de réduire les temps de calcul. Il utilise un modèle de route linéaire et simplifié. Après une phase d'initialisation nécessaire au démarrage du processus, l'algorithme se déroule en trois phases : phase de prédiction, phase

de détection et phase de réactualisation. Cette méthode est fiable dans les conditions normales et demande un temps de calcul raisonnable. Néanmoins, afin d'améliorer la détection et la réactualisation du modèle, *Chapuis* a proposé une autre solution qui privilégie la robustesse de la méthode au détriment du temps de calcul. C'est l'objet de sa seconde méthode, dite méthode fenêtres.

Dans cette seconde méthode, l'algorithme analyse non pas des lignes horizontales dans l'image, mais des zones d'intérêt. Ce choix a permis de prendre en compte les caractéristiques de continuité et d'orientation des bandes blanches. Dans ce cas, les résultats montrent que la détection est meilleure et permet d'améliorer l'estimation de la courbure de la route. Ce gain de robustesse est lié au fait que cette méthode utilise beaucoup mieux les caractéristiques des bandes. Cet algorithme a été implanté sur un système informatique à architecture parallèle *Transvision*, développé au sein du L.A.S.M.E.A. [Legrand 95].

Dans [Kanatani 88], une méthode de reconstruction 3D de routes à partir d'une séquence d'images issues d'une seule caméra est présentée. Celle-ci est utilisée pour la navigation d'un véhicule autonome. La route est supposée localement plane et l'analyse est faite uniquement dans l'espace image. Une analyse des singularités dues à la contrainte de l'approximation de la planéité est effectuée.

Dans le domaine agricole, nous pouvons citer par exemple les travaux de recherche du CEMAGREF [Derras 93] sur la vision en robotique agricole. Ceux-ci visent à guider des engins agricoles sur la limite de fauche (séparation entre la partie fauchée et la partie non-fauchée), qui est modélisée par une droite 2D dans l'image en utilisant une seule caméra CCD embarquée.

Les premiers travaux dans le suivi de route dans un environnement extérieur sont réalisés à l'université de Carnegie Mellon par *Wallace et al.* [Wallace 86]. Dans ses travaux, une approche de commande référencée capteur est mise en œuvre dans l'espace image. Elle consiste à extraire des primitives de la route plutôt que de segmenter la route et utiliser des techniques de découpage.

Dickmanns présente dans [Dickmanns 87], [Dickmanns 92] et [Dickmanns 93] un véhicule autonome VAMORS⁵ capable d'évoluer à grande vitesse sur autoroute. Il a décrit d'un autre côté plusieurs systèmes de suivi sur autoroute à des vitesses allant jusqu'à 100 km/h. Dans son approche, il a utilisé un filtre de *Kalman* afin de restreindre la recherche des informations de la route sur des petites fenêtres d'intérêt dans l'image [Dickmanns 85] [Dickmanns 89]. Actuellement, les recherches tendent à supprimer des contraintes afin de pouvoir se déplacer dans un large éventail de situations, sur tous les types de routes et dans toutes les conditions de météorologie, d'éclairement et de trafic [Dickmanns 94].

5. Vehicle for autonomous Mobility through computer vision (Rechnersehen)

1.3.2.2 Vision couleur

La couleur apporte des informations complémentaires dans la classification des éléments de l'environnement. Deux types de capteurs de technologie CCD existent. Le premier consiste en l'utilisation d'une grille de filtres rouges, verts et bleus, disposée à la surface du capteur. Les trois canaux sont multiplexés selon les standards vidéo. Une autre technologie (tri-CCD) consiste à utiliser trois capteurs CCD, chacun filtré dans sa couleur, et à les associer dans une seule caméra.

La couleur peut être en soi intéressante pour classifier un objet, surtout si les propriétés spectrales sont connues (route, bord de route). Le domaine d'application de la vision couleur est vaste et varié. Elle est utilisée dans l'industrie agro-alimentaire, l'imagerie par satellite, l'analyse des scènes extérieures (suivi de routes non structurées), l'imagerie médicale, l'analyse de cartes routières et dans certaines chaînes industrielles [Grimm 94].

Une première tendance des travaux concernant les traitements couleur est établie sur la base de modèles statistiques ou décisionnels. Ces techniques sont utilisées par exemple pour les applications de suivi de route en robotique mobile autonome. Cette approche se scinde en deux classes : les méthodes dites supervisées, basées sur un apprentissage initial des classes, et les méthodes non-supervisées indépendantes de tout apprentissage. Une évaluation expérimentale de ces différentes techniques est proposée dans [Sandt 93].

Le robot ALV⁶, développé aux USA par *Martin Marietta* [Turk 86] utilise une caméra couleur pour la segmentation des routes et des bords. Par le choix optimal de la pondération des trois canaux couleur, l'image sommée permet une classification rapide par simple seuillage. L'interprétation tridimensionnelle de l'image à des fins de guidage repose alors sur un modèle géométrique simple de la route. Les travaux présentés dans [Waxman 85], [Waxman 87] et [David 90] utilisent pour les mêmes fins de suivi aussi bien sur une route que sur un chemin, deux caméras couleurs et de nombreux capteurs.

Parallèlement au projet ALV, la FMC Corporation a effectué des recherches en robotique mobile destinées à des fins militaires pour le transport de troupes. Ce véhicule est équipé entre autres de plusieurs caméras couleurs, d'un sonar, d'un détecteur infrarouge et ultrasonique et d'un télémètre laser. Par contre, la plupart des opérations liées à la planification de la mission, à la perception du chemin, à l'évitement d'obstacles, au suivi de chemin, sont effectuées à l'extérieur du véhicule par transmission hautes fréquences en liaison avec un centre de calcul ([Kuan 86], [Kuan 87] et [Sharma 89]).

Le véhicule NAVLAB⁷, développé par l'université Carnegie-Mellon, utilise une caméra couleur couplée avec un dispositif laser permettant d'obtenir les informations de profondeur. Le dispositif est destiné à une utilisation en contexte autoroutier ([Thorpe 88], [Thorpe 90]). Ce groupe de recherche développe des méthodes pour détecter et suivre des routes dans un environnement réel. Il s'intéresse aux problèmes liés aux changements de couleur de la route, aux variations de l'intensité lumineuse, à la présence de zones d'ombre

6. Autonomous Land vehicle

7. NAVigator LABoratory

et d'ensoleillement sur la chaussée et aux différentes qualités de revêtements utilisés pour les routes. Il présente de nouvelles méthodes de reconnaissance de la route dans les images issues de deux caméras couleurs [Crisman 91]. L'une d'entre elles permet de mettre en évidence les zones d'ombres et l'autre les zones d'ensoleillement.

Le travail de THOMSON-CSF/LER [Raboisson 94] est dédié à la détection d'obstacles dans un environnement autoroutier en utilisant une caméra CCD couleur avec un prototype de traitement d'images, installés sur un véhicule. Ce travail a été développé en collaboration avec les constructeurs d'automobiles français (RENAULT et P.S.A.) dans le cadre du programme européen PROMETHEUS. L'objectif de ce projet est de présenter au conducteur des informations sur la zone de manœuvrabilité du véhicule ainsi que sur le niveau de sécurité associé à la situation du trafic. Les conditions de fonctionnement sont celles correspondant à la lumière du jour avec des conditions normales de trafic sur autoroute. Le système est composé de deux processus de base. Le premier est lié à l'extraction de la route qui consiste l'élément majeur de la scène à analyser. Le second processus concerne l'étape de détection d'obstacles. Le temps réel application est inférieur à 300 ms qui a été évalué comme valeur suffisante afin d'effectuer des tests en conditions réelles. Le démonstrateur, constitué d'un véhicule *Renault Safrane*, roule à une vitesse de 130 km/h sur autoroute. Sur la plan pratique, le nombre d'obstacles à suivre est limité à 5.

Une seconde tendance concerne le développement de techniques de traitement d'images sur la base de modèles physiques de l'éclairement comme le modèle dichromatique. Cette approche physique consiste à dire que, dans l'espace chromatique, la distribution des pixels d'un objet obéit à des règles physiques. Ces techniques sont complexes et les expérimentations montrent que les modèles physiques ne sont pas utilisables dans les conditions d'éclairement naturel qui ne satisfont pas les hypothèses d'un monde gris [Fargeon 93].

1.3.3 Quelques approches pour la vision

Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté quelques travaux utilisant uniquement une caméra monochrome ou une caméra couleur. Maintenant nous allons décrire les principales approches couramment employées en vision artificielle en donnant quelques applications.

1.3.3.1 Vision stéréoscopique

Une caméra unique permet de détecter un grand nombre d'éléments et de propriétés de l'environnement, mais il faut d'autres techniques pour accéder aux informations de profondeur des éléments de la scène. Il peut s'agir par exemple d'une seule caméra et d'une séquence d'images. La profondeur peut aussi être déduite à partir d'images binoculaires, par stéréovision. La stéréovision autorise l'accès aux informations tridimensionnelles de la scène observée. Le principe utilisé est celui de la triangulation. La difficulté réside dans la mise en correspondance 2D des indices visuels de chaque image. Cette méthode est utilisée

pour la modélisation 3D de scènes d'intérieur ainsi que pour la détection des obstacles. Elle permet de reconstruire la profondeur des surfaces des objets. La reconstruction de l'objet est faite afin de déterminer sa position et son orientation par rapport à la caméra. Il est possible d'obtenir de telles informations par stéréoscopie [Faugeras 88], [Ayache 89].

L'I.N.R.I.A. utilise trois caméras pour la saisie 3D de l'environnement dans le cadre du projet ESPRIT DMA. Cette vision trinoculaire a l'avantage de rendre plus robustes les appariements des points caractéristiques détectés dans l'image et d'accroître de ce fait la vitesse des traitements [Buffa 93].

Le Système IDATEN du laboratoire *Fujitsu* au Japon est un exemple mettant en évidence des applications de suivi et de détection d'obstacles en utilisant un système de stéréovision [Ozaki 90]. Il s'agit d'un équipement électronique implanté sur un véhicule commercial de type *Van*. Il permet de détecter la signalisation horizontale et les objets présents sur une route en temps réel vidéo. Le véhicule est équipé de cinq caméras monochromes dont trois sont utilisées pour détecter les bandes blanches situées dans l'axe de déplacement rectiligne du véhicule d'une part, et d'autre part de l'axe de déplacement latéral du véhicule. Les deux autres sont utilisées pour détecter les objets présents dans la scène par stéréovision. L'algorithme de détection des bandes blanches nécessite des conditions spécifiques. Les bandes doivent être nettes et continues sur les deux côtés de la route, elles ne doivent pas se croiser et le revêtement doit être propre. L'algorithme de détection d'obstacles utilise le principe de la stéréovision avec deux caméras positionnées suivant un axe vertical. Il s'agit d'extraire les bords horizontaux grâce aux deux images et d'effectuer un appariement entre les deux. Ainsi, il est possible de détecter et de localiser tout objet se trouvant sur la route et dans le champ des deux caméras.

Au Japon, la société ITMI a réalisé pour la société MAZDA un système stéréoscopique de détection d'obstacles en considérant l'hypothèse de planéité de la route. La méthode a été testée en temps différé sur des scènes d'autoroutes [Fargeon 93].

Plusieurs autres projets emploient un système stéréoscopique. Nous pouvons citer les travaux menés dans le cadre du projet EUREKA PROMETHEUS pour la navigation autonome d'automobiles. Dans le travail présenté dans [Bruyelle 94], un dispositif de stéréovision basé sur l'utilisation de caméras linéaires est réalisé afin de détecter des obstacles à court et moyenne distance, un piéton par exemple.

Dans le cadre de la robotique autonome planétaire, un système binoculaire trouve son application dans le domaine de la navigation et de l'exploration spatiale [Capurro 93]. Enfin, plusieurs robots de laboratoire utilisent la stéréovision comme outil de modélisation de scènes. On peut citer, entre autres, les travaux de l'I.N.R.I.A. de Sophia Antipolis [Buffa 93] et du LAAS⁸ [Giralt 90].

8. Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes

1.3.3.2 Vision dynamique et active

On parle de vision dynamique lorsque le déplacement de la caméra a un mouvement parfaitement connu [Rives 87]. Les principales fonctions de la vision dynamique pour la robotique mobile autonome sont essentiellement liées à la détection d'obstacles, à la structuration de l'environnement en zones de mouvement homogène et au repérage par rapport à des amers [Blisset 90]. Cette dernière technique exploite les mouvements du véhicule et elle est utile aux fonctions de détection d'obstacles et à la modélisation de l'environnement.

On peut citer quelques applications sur la détection d'obstacles dans un environnement routier où le flot optique est exploité pour réaliser une différence entre le flot prédit et le flot estimé [Ilic 94], [Giachetti 94]. En effet, les pixels de l'image à l'instant t peuvent être prédits à l'instant $t + 1$ en utilisant une estimation du mouvement du véhicule entre les deux instants. Au sein du programme PROMETHEUS, la détection des objets mobiles repose sur des techniques de segmentation au sens du mouvement s'appuyant sur un modèle statistique global de l'image (champs markoviens, algorithmes de relaxation) [Heitz 93].

Le projet HILARE du LAAS à Toulouse est un robot mobile autonome destiné à être un support expérimental pour diverses applications utilisant la vision. L'un des systèmes de vision utilisé est équipé de deux caméras pour réaliser de la vision dynamique [Herrb 91].

Dans le cas où le mouvement de la caméra est contrôlé, nous parlerons de *vision active*, et une séquence d'images sera analysée afin d'améliorer l'information 3D de l'environnement [Aloimonos 87].

Le terme de vision active désigne la mise en œuvre de plusieurs compétences dans un système sensoriel afin de réaliser une tâche donnée. Elle offre la possibilité d'optimiser les modalités d'utilisation des capteurs et des traitements. Les travaux relatifs à ce domaine visent à agir sur différents paramètres au cours du temps. Ces paramètres peuvent concerner, par exemple, la caméra (gain, offset), l'objectif (focale, mise au point, fermeture du diaphragme) et la situation de la caméra dans l'espace (position et orientation).

La vision active connaît actuellement un essor important dans le domaine de la vision dynamique. Les premiers travaux concernant cette méthodologie ont été réalisés par Aloimonos [Aloimonos 87]. Dans cette approche de la vision active, le processus d'analyse d'images est considéré comme dynamique et non plus statique. Le traitement de l'image est appliqué, non plus à une seule image, mais à une séquence d'images, ceci afin d'améliorer la perception de l'environnement. Ainsi, Aloimonos fait la distinction entre un observateur *passif* et un observateur *actif*. Il considère qu'un observateur est actif lorsqu'il est engagé dans certaines activités dont le but est de contrôler les paramètres géométriques du capteur visuel. Le rôle de cette activité est d'agir sur les contraintes dues au phénomène observé afin d'améliorer les résultats de la perception. Un observateur monoculaire se déplaçant avec un mouvement connu ou inconnu, ou un observateur binoculaire

capable d'orienter ses yeux et de suivre les différents objets constituant l'environnement, sont deux exemples d'observateurs dits actifs.

Certains travaux tendent à montrer que l'utilisation de la vision active simplifie les tâches visuelles [Carlson 88]. Dans toutes ces recherches, l'analyse est plutôt qualitative et les développements restent encore théoriques. *Bajcy* définit le concept de *la perception active* en incluant la notion de «*feed-back*» [Bajcy 88]. Cette dernière approche diffère de celle d'*Aloimonos* par le fait que l'accent est mis principalement sur l'étude de la modélisation des capteurs, des objets, de l'environnement et sur leur interaction réciproque dans un but donné, par exemple la manipulation, la navigation ou la reconnaissance. Le démonstrateur développé au LIFIA⁹ dans le cadre du projet *Vision as Process* est un exemple des ambitions de la vision active en France [Crowley 94]. Il s'agit d'une tête binoculaire à six axes portée sur un robot manipulateur, lui-même embarqué sur un robot mobile *Robuter*.

Une fois que la technique de commande, le capteur de vision et la technique de perception sont figés, il importe de savoir comment réaliser la boucle d'asservissement et de ce fait quel est le schéma d'asservissement à adopter. Le choix est effectué parmi les différents schémas que l'on peut rencontrer d'une manière générale dont voici leurs caractéristiques ainsi que qu'une synthèse de leurs principales différences.

1.3.4 Asservissements visuels

L'utilisation des capteurs extéroceptifs pour la commande des robots manipulateurs a été abordée à l'aide des capteurs proximétriques. Dans les années 80, *Espiau* a effectué les premiers essais de commande à partir de ces capteurs. Ils ont permis de faire une analyse complète de la commande, en termes de stabilité et de robustesse [Espiau 87]. En général, plusieurs boucles sont superposées, et le réglage de leurs différents gains assure la stabilité du système. Dans de nombreux cas, plusieurs niveaux sont nécessaires, et différents capteurs viennent refermer les boucles de commande. Ils ont en général des constantes de temps différentes, et parfois des asynchronismes dans le débit de leurs informations.

Parmi les premiers travaux sur les asservissements visuels on peut citer ceux réalisés par *Weiss* et *Sanderson* [Sanderson 83]. Ils présentent deux approches bien distinctes pour la commande des robots à partir d'informations visuelles. La première est basée sur la recherche de la position du robot, et donc sur l'asservissement du robot à partir de cette position. La seconde, qui supprime beaucoup d'inconvénients de l'approche précédente, recherche le mouvement à donner au robot directement à partir des informations visuelles. Nous allons maintenant détailler les quatre schémas de commande repris dans [Hager 96].

9. Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle de Grenoble

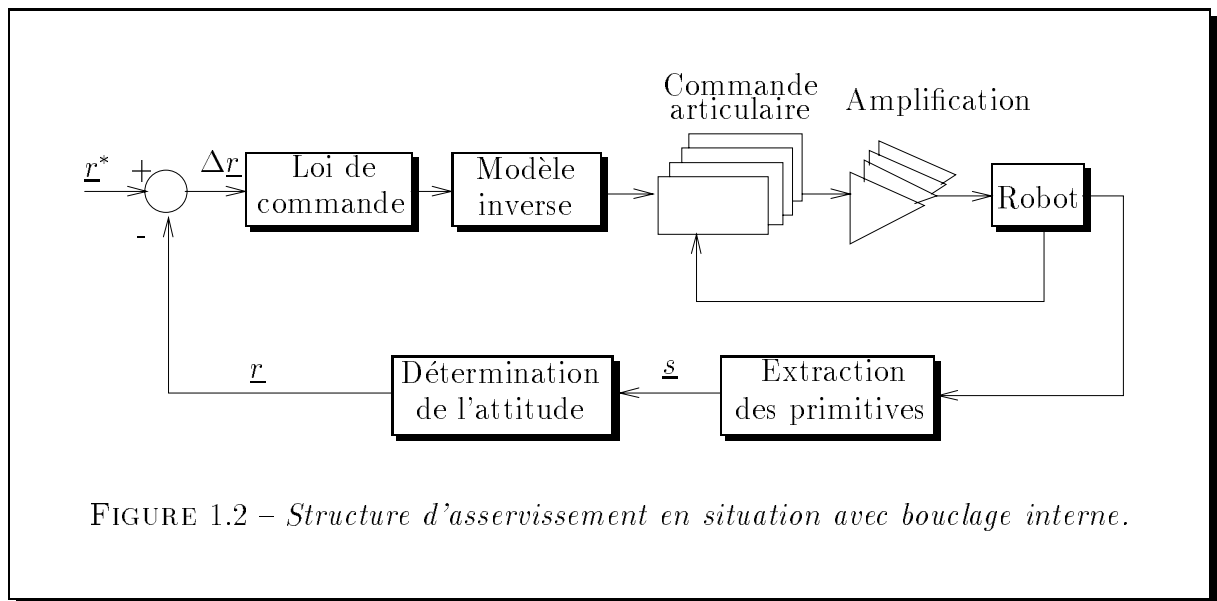
1.3.4.1 Asservissement en situation

L'asservissement en situation (en anglais «position-based») consiste à positionner la caméra par rapport à un objet. La situation courante de la caméra vis-à-vis de l'objet est obtenue en interprétant les informations visuelles de l'objet qui sont extraites de l'image. Le déplacement du robot est ensuite assuré par un asservissement classique en position dans l'espace cartésien. Pratiquement, pour atteindre une situation désirée, il faut tenir compte des erreurs dues à l'extraction d'attributs dans l'image, à la modélisation de la caméra et à la modélisation du robot.

Dans ce cas, deux schémas d'asservissement peuvent être proposés. L'un présente un schéma composé de la boucle d'asservissement interne du robot. Dans l'autre le robot est piloté en position sans boucle interne. Nous les présentons dans les paragraphes suivants.

1.3.4.1.1 Asservissement en situation avec bouclage interne

Cette approche doit fournir un signal de référence lié au repère de l'effecteur du robot. Pour cela, une étape d'interprétation de l'image est nécessaire afin de déterminer la position et l'orientation de l'effecteur par rapport à un repère connu (voir Figure 1.2).



Sous cette approche, deux schémas de commande peuvent être distingués : statique ou dynamique. Nous allons maintenant les décrire.

• Asservissement en situation statique

Cette structure de commande était encore la plus utilisée dans les applications industrielles ces dernières années. Une première étape consiste à acquérir une image «Look» afin de

pouvoir extraire les paramètres donnant la situation actuelle de l'effecteur. Cette première étape ne peut être réalisée qu'à partir de la connaissance à priori des objets constituant la scène, ou si certains paramètres de la situation de l'effecteur sont connus. A partir de cette situation calculée, et de la situation désirée, la loi de commande pourra déduire une erreur $\Delta \underline{r}$ qui va traduire le déplacement que devra subir le robot. Une deuxième étape consiste à agir sur le robot afin de satisfaire la condition précédente «Move».

Cette structure (en anglais «Static look and move») n'est pas une commande dynamique en boucle fermée car chaque opération est accomplie séquentiellement et de façon indépendante. Ainsi, la dynamique de chaque opération n'affecte en aucune manière le système global. La régulation est très lente et elle nécessite plusieurs itérations afin d'aboutir à la situation prédéfinie. Le robot devient incapable de suivre des objets mobiles.

• Asservissement en situation dynamique

Dans l'approche «Static look and move» la situation de référence du robot ne peut être réactualisée qu'une fois que le robot a atteint le but qui lui a été fixé. Dans l'approche asservissement en situation dynamique (en anglais «Dynamic look and move»), les différentes commandes du robot peuvent être réactualisées à tout moment et indépendamment de la position et de la vitesse du robot. Dans cette approche, les étapes précédentes sont identiques mais peuvent être effectuées en parallèle (estimation de la situation de l'effecteur, estimation de l'erreur $\Delta \underline{r}$, correction des consignes à envoyer au robot) alors qu'il est déjà en mouvement. Cette commande dynamique en boucle fermée exige de déterminer un correcteur visuel afin de compenser la dynamique du système.

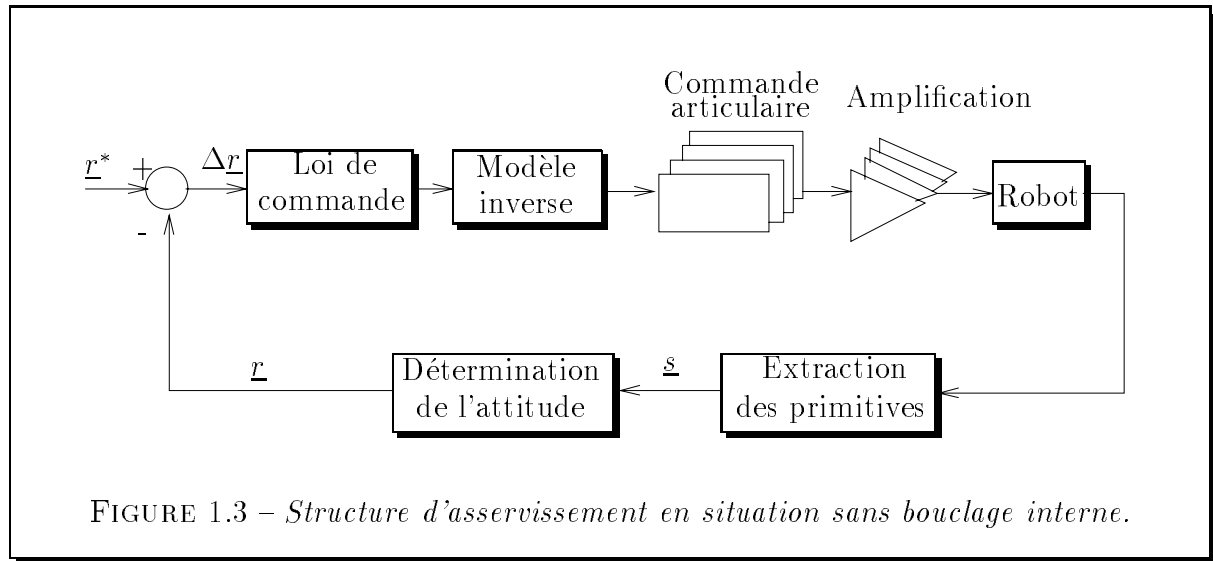


FIGURE 1.3 – Structure d'asservissement en situation sans bouclage interne.

1.3.4.1.2 Asservissement en situation sans bouclage interne

Dans ce cas, une approche similaire à l'approche «asservissement en situation dynamique

avec bouclage interne» est retenue. La seule différence est que dans le schéma d'asservissement on ne retrouve pas les asservissements bas-niveau qui permettent d'assurer la stabilité interne du robot (voir Figure 1.3).

Cette approche est très peu utilisée, car la recherche des différentes lois de commande nécessite de prendre en compte la dynamique du robot.

Nous allons maintenant aborder le deuxième concept de l'interaction Vision/Commande qui utilise directement les informations visuelles pour la commande des robots. Cette approche porte le nom de «*Image-based*», elle correspond à un asservissement dans l'image.

1.3.4.2 Asservissement dans l'image

L'asservissement dans l'image a pour objectif d'atteindre un motif dans le plan de l'image et non plus de contrôler une situation entre la caméra et l'objet. Ainsi, on supprime la phase de reconstruction d'un modèle 3D et on élimine aussi les erreurs sur l'estimée de la situation et les calculs complexes.

Dans les approches précédentes, où l'asservissement du robot est effectué par rapport à la situation de ce dernier, l'étape d'interprétation des images peut être complexe. Elle peut affecter le comportement du système global, car :

- les temps de calculs pour déterminer la situation de l'effecteur par rapport à son environnement (les algorithmes peuvent être très longs et très complexes) sont importants,
- les différents bruits dus à la modélisation des objets constituant la scène et les imprécisions dues à la modélisation du capteur visuel sont non négligeables.

Les caractéristiques image sont souvent des fonctions continues de la situation de l'objet, et ainsi elles peuvent fournir des informations suffisantes pour la commande du robot sans que nous ayons à interpréter ces informations pour en recueillir la situation de l'effecteur. Ainsi, la commande n'est pas réalisée sous la forme d'une situation à obtenir entre l'effecteur du robot et la scène mais comme un motif à atteindre dans l'image. Pour qu'une tâche robotique soit réalisée, il faut que les informations visuelles $\underline{s}$, nécessaires à la bonne réalisation de cette tâche, correspondent aux informations désirées $\underline{s}^*$. On peut remarquer qu'avec cette approche les tâches robotiques réalisables par l'approche asservissement en situation le sont également par l'approche asservissement visuel dans l'image. Mais, il est important et nécessaire de choisir les informations «utiles» à la bonne réalisation de cette tâche. Cette constatation est également valable pour un asservissement en situation car il est nécessaire de choisir des informations image pertinentes permettant de retrouver la situation de l'effecteur par rapport à son environnement. L'utilisation des informations image a permis de construire une multitude de tâches robotiques, ces informations étant choisies à partir de la scène traitée.

Les premiers travaux concernant cette modélisation sont dus à *Feddema* [Feddema 89a], [Feddema 89b]; ils concernent la modélisation des points pour la commande d'un robot à quatre degrés de liberté (trois positions et une orientation). En effet, différents travaux ont été menés afin de caractériser les différentes informations visuelles choisies dans la commande d'un robot. Cette modélisation permet d'établir une relation entre les variations des primitives image et le mouvement de la caméra [Rives 89], [Chaumette 90] et [Espiau 92].

Dans l'approche asservissement visuel, *Sanderson* et *Weiss* distinguent également les deux schémas de commande que nous présentons dans ce qui suit [Sanderson 80].

1.3.4.2.1 Asservissement dans l'image dynamique avec bouclage interne

Cette approche recherche, à partir des motifs de l'image désirée et des motifs réels, les différents déplacements à appliquer au robot dans le repère lié à l'effecteur (espace opérationnel). Cette technique permet de supprimer l'étape d'interprétation de la situation de l'effecteur, et délivre les différents gains de commande à injecter au niveau des actionneurs (voir Figure 1.4).

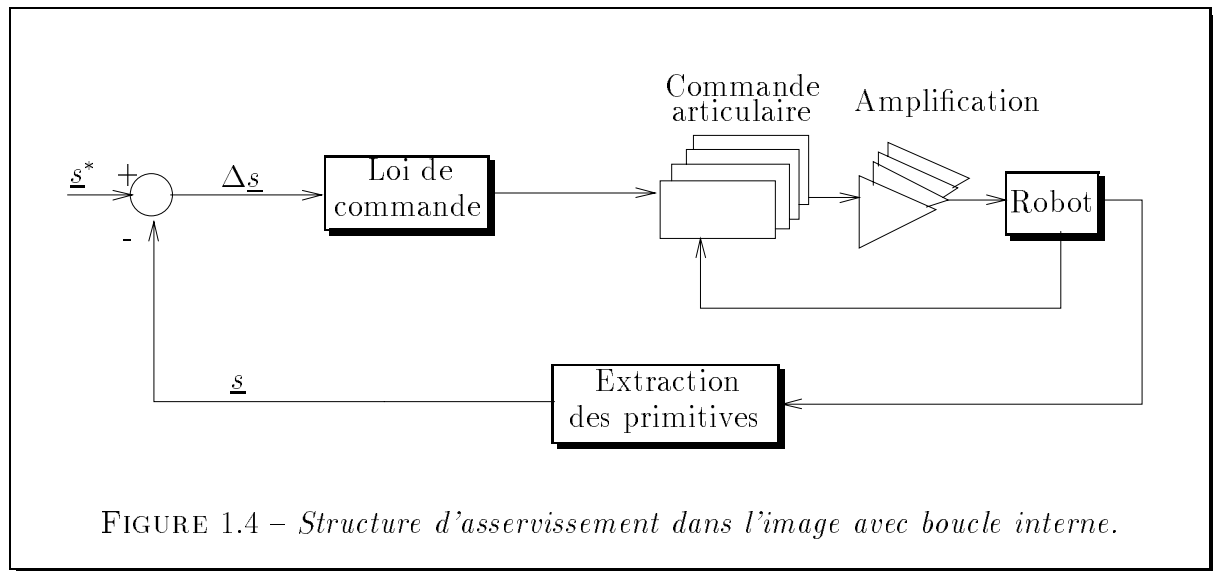
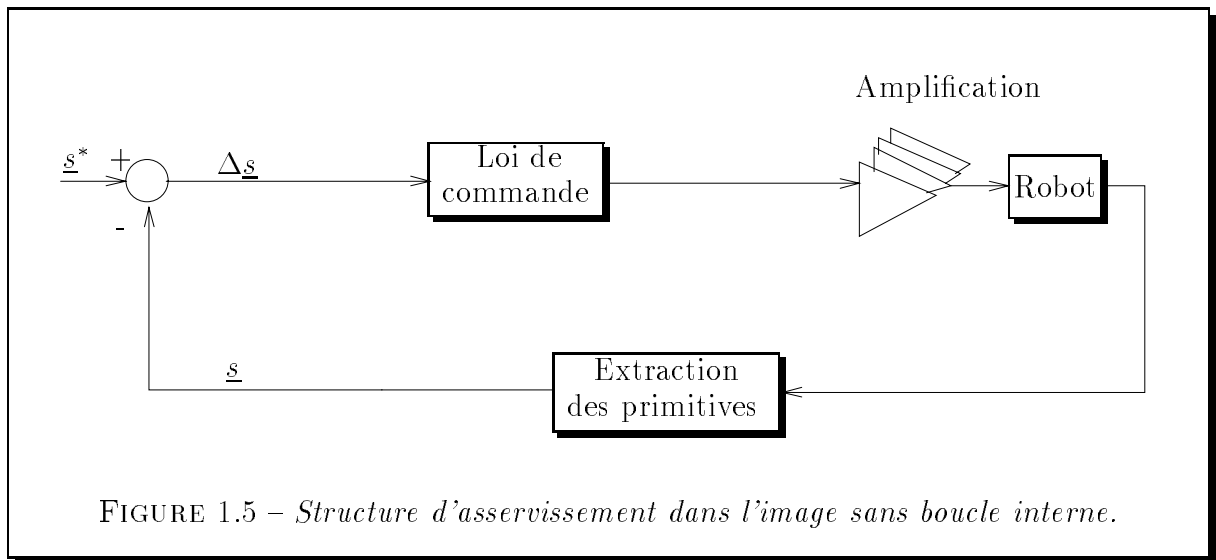


FIGURE 1.4 – Structure d'asservissement dans l'image avec bouclage interne.

1.3.4.2.2 Asservissement dans l'image sans bouclage interne

Cette approche est identique à l'approche asservissement en situation sans boucle interne si ce n'est que l'on calcule les différentes consignes directement à partir des informations image. Cette fois-ci la phase d'interprétation est éliminée, mais la loi de commande doit tenir compte de l'interaction entre le signal image et les actionneurs du robot (voir Figure 1.5).



1.3.5 Discussion

Nous avons vu à travers les différentes applications en vision qui couvrent la robotique, que le choix d'une technique de vision est attaché à l'impératif fixé. Le choix du capteur, par exemple, est décidé en fonction de l'objectif et du cahier des charges de l'application visée. Par ailleurs, dans le domaine particulier de l'interprétation des scènes routières avec un système de vision embarqué, il faut faire un compromis entre la qualité des résultats et le temps de calcul pour des applications temps réel. C'est la raison pour laquelle, il est toujours souhaitable d'avoir :

- des algorithmes de traitement d'images et des modèles (de route ou de véhicules) les plus simplifiés possibles,
- un système de traitement d'images optimisé vis-à-vis de l'application (temps de calcul et architecture informatique).

La technique de vision est aussi un élément important à prendre en ligne de compte. Le choix de celle-ci pourrait être fait selon la qualité de la scène et selon le type du traitement à faire. Tout cela est lié à la mission à donner au robot et la manière dont il doit évoluer dans l'environnement.

Par ailleurs, nous avons montré les quatre schémas d'asservissement visuels en vue de la commande en robotique fixe ou mobile. On retient essentiellement deux sous-groupes de schémas. Le premier consiste à effectuer une régulation dans l'espace tridimensionnel lié au robot. Dans ce cas, le traitement de l'image sert à interpréter la scène. Ce sont les paramètres de localisation qui sont bouclés pour la régulation. Le second sous groupe

permet de générer la commande dans l'espace image de la caméra. L'intérêt de cette méthode est l'utilisation directe des informations capteurs pour la commande. Ceci permet d'éviter les erreurs de modélisation du robot et du capteur d'une part et facilite le traitement d'autre part. Notons que dans les deux sous-groupes on distingue les cas où les systèmes possèdent des boucles internes de régulation bas niveau.

1.4 Conclusion

Les différents projets de recherche en robotique mobile présentés dans cette partie montrent que les solutions apportées, tant sur le plan de la commande que sur le plan de la perception, diffèrent selon l'objectif de l'application et selon le matériel embarqué. Tous ces systèmes sont implantés dans des véhicules expérimentaux et demandent des temps de calcul élevés. Ainsi, un matériel spécifique est souvent utilisé.

En d'autres termes, un robot «*intelligent*» exige la combinaison des trois éléments suivants [Briot 91] :

- la fonction «perception» qui englobe les matériels et les logiciels nécessaires à la construction du ou des modèles de l'environnement qui vont être utilisés par la fonction décision,
- la fonction «décision» qui permet d'utiliser ces modèles afin de planifier les différentes actions nécessaires pour la prise de décision, après la désignation du but à atteindre,
- et la fonction «action» qui exécute cette décision avec les différents moyens d'action dont dispose le robot.

L'utilisation d'une caméra embarquée sur un robot présente différents avantages. Du point de vue de la commande, l'endroit indiqué pour fixer la caméra est celui qui interagit avec l'environnement du robot et c'est son mouvement qui définit l'exécution d'une tâche. Ainsi, on peut espérer extraire du capteur de vision les données nécessaires à la régulation du mouvement de la caméra. Par ailleurs, l'utilisation de capteurs de vision embarqués, comme système de mesure, fournit un moyen pour vaincre les limitations dues à la modélisation inexacte du robot, à condition de connaître la transformation rigide qui lie le repère de la caméra à celui du monde 3D. Enfin, cette configuration du capteur, intégré sur le robot, permet de formuler la commande dans un espace nouveau, *l'espace de la tâche*, puisque le capteur de vision fournit des informations sur la position relative par rapport à la tâche. Nous parlerons alors de *commande référencée capteur* [Espiau 87].

Ce chapitre introduit le cadre de notre étude qui concerne la commande référencée vision pour la robotique mobile. L'interaction vision/commande est l'élément clé de notre travail. C'est la raison pour laquelle nous voulions faire un état des recherches tant sur le

plan de la commande, liée aux méthodes de synthèse de lois de commande et plus particulièrement au contrôle latéral d'un véhicule, que sur l'aspect vision qui lui est directement attaché.

Les chapitres suivants sont conçus dans le but de garder à l'esprit les deux aspects : *robotique mobile et commande référencée vision*.

Chapitre 2

Modélisation du véhicule

The inevitable comes to pass by effort
Oliver Wendell Holmes

Il est traité dans ce chapitre la modélisation de véhicules à quatre roues, utilisées comme base mobile, dont deux sont directrices. Après un bref état de l’art sur les travaux de recherche en modélisation de véhicules, nous donnons quelques caractéristiques d’un véhicule automobile. Ensuite, nous dégageons un modèle cinématique général pour un robot mobile et un modèle dynamique d’un véhicule automobile. Ce dernier est synthétisé à partir de l’analyse du mouvement en lacet du véhicule. Les différents modèles, cinématiques et dynamiques, sont validés et comparés en simulation.

2.1 Introduction

Afin de commander et de contrôler un véhicule, certains modèles plus ou moins exacts sont nécessaires. Ceux-ci concernent la cinématique du véhicule, la dynamique de celui-ci et de ses actionneurs, et enfin les effets systématiques liés à l’implantation des lois de commande, comme le retard par exemple.

Un véhicule est un système composé d’un assemblage complexe de plusieurs composantes de différents types : mécanique, pneumatique, électrique ou thermique. Chaque organe possède un rôle particulier dans son fonctionnement. Par ailleurs, il est difficile d’avoir un modèle de véhicule prenant en compte toutes ces composantes, sinon son degré de complexité serait élevée et sa manipulation lourde. L’identification des caractéristiques de l’ensemble des composantes permettant de reconstruire le modèle représente un travail très difficile, qui ne concerne que les concepteurs de véhicules, car leurs paramètres peuvent varier énormément d’une situation à une autre. Leur forme complexe présente un inconvénient dans le sens où ils ne permettent pas la synthèse d’une loi de commande

adaptée et réalisable en temps réel. Dans ce cas, il est souvent difficile de choisir les composantes essentielles à considérer de façon à ce que le comportement à obtenir soit le plus proche de la réalité et suffisamment simple pour son implantation.

Dans les cas d'applications réelles de guidage utilisant un modèle, on s'intéresse en général, seulement aux parties significatives du système en lui imposant des contraintes de fonctionnement simplificatrices. On peut dire que dans le cas d'un système complexe comme une voiture, l'une des qualités requises pour sa modélisation est l'adéquation entre sa simplicité et son réalisme vis-à-vis de l'application envisagée.

L'industrie automobile s'intéresse depuis longtemps à la modélisation dynamique de véhicules automobiles. Ceci a suscité un intérêt particulier auprès des chercheurs dans différents laboratoires de recherche. On peut citer [Deutsch 70] où une étude globale de la dynamique des véhicules routiers est réalisée. Cette étude obéit à deux orientations principales. La première consiste à déterminer avec le maximum de précision les caractéristiques géométriques souhaitables pour des routes adaptées à grande vitesse. Le second objectif était d'approcher par le calcul, le comportement du véhicule automobile dans un certain nombre de situations difficiles ou dangereuses (freinage, sollicitations transversales, inscriptions en courbes).

Dans [Bartels 85] un logiciel ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), capable d'analyser et de simuler des systèmes mécaniques multicorps à plusieurs dimensions, est expérimenté pour le cas de véhicules automobiles. Des modèles dynamiques complets, tenant compte des différents degrés de liberté, sont simulés et utilisés par le constructeur automobile *Ford*.

Pour des applications de guidage en temps réel, des modèles cinématiques et dynamiques simplifiés sont utilisés et s'avèrent suffisants. Généralement, les modèles dynamiques utilisés regroupent la dynamique latérale et/ou la dynamique longitudinale selon que l'on souhaite un contrôle latéral et/ou longitudinal du véhicule.

Dans [Fenton 76] une spécification du modèle latéral modifié d'un véhicule de tourisme est synthétisée. C'est un modèle bicyclette qui caractérise le phénomène du mouvement en roulis, donné sous forme d'un polynôme caractéristique du second ordre. Les différents paramètres du modèle sont déterminés à partir des tests d'identification sur le véhicule par des mesures statiques et une réponse fréquentielle du modèle.

Dans [Fenton 91] deux modèles, longitudinal et latéral, sont utilisés. La fonction de transfert du modèle longitudinal est du troisième ordre, mettant en évidence trois blocs. Le premier correspond à la dynamique de l'actionneur et dépend de deux paramètres non-linéaires. Le second bloc modélise les forces de frottement liées au mouvement longitudinal. Le dernier bloc étudie le glissement des roues qui contient une autre fonction non-linéaire, liée aux conditions de la route.

Les travaux de *Palkovics et al.* [Palkovics 92] considèrent un véhicule à quatre roues directrices avec deux entrées de commande pour les roues avant et arrière. On trouve une analyse de la réponse du système lorsque la pression des pneus des roues arrières

est inférieure à la normale. Le modèle dynamique utilisé est simplifié et adapté pour la détermination d'une loi de commande dans l'espace d'état.

Les modèles élaborés par *Dickmanns et al.* sont adaptés pour le guidage de véhicules automobiles par vision [Dickmanns 88]. Dans [Dickmanns 85], on traite la modélisation dynamique longitudinale et latérale d'une voiture à deux roues directrices. Il a considéré un modèle bicyclette plan à deux degrés de liberté, et que celui de l'actionneur de direction est considéré comme un intégrateur [Dickmanns 87]. Le modèle longitudinal est découplé du modèle latéral, et de ce fait, pour des routes courbées, une valeur permise de l'accélération latérale est spécifiée afin de rester dans le domaine de validité du découplage.

Le modèle développé dans [Nalecz 89] est d'ordre trois et tient compte du mouvement de roulis et tangage. On utilise dans ce cas la méthode des fonctions de sensibilité pour l'analyse et la synthèse de la dynamique du véhicule. Le développement de ces méthodes a servi à l'étude de l'effet des variations des paramètres du modèle sur la réponse dynamique du système.

Dans [Fryba 87], on trouve une étude des problèmes liés aux vibrations dues aux contacts roues/sol à partir des équations de base caractérisant le comportement des différents éléments (véhicule, route). L'effet de quelques paramètres tels que la vitesse et les irrégularités dues aux différents types de route est analysé. Une solution simple est obtenue à partir de modèles théoriques en spécifiant les possibilités et le domaine de validité des simplifications.

Dans [El-Madany 90], une analyse des systèmes de suspension de véhicules est formulée afin de déterminer la stabilité et la réponse à une force extérieure ou à une perturbation de la route. Des perturbations de type déterministe et aléatoire ont été considérées durant les tests. Il a été montré qu'un niveleur de charge offre un mécanisme viable pour le contrôle de l'attitude du véhicule.

Dans le cas des robots mobiles, nous pouvons dire que le problème de la modélisation dynamique et de l'identification des paramètres n'a pas été suffisamment abordé. Ce manque d'intérêt s'explique par le fait que jusqu'au début des années 90, seul le modèle cinématique était utilisé pour la commande du robot ([Kimura 90] [Samson 90b] [Crowley 92] [Lee 93]). Dans les cinq dernières années, plusieurs chercheurs se sont intéressés à la modélisation et à la commande dynamique des robots mobiles ([Samson 90a], [d'Andrea-Novet 92a], [Campion 93], [Alloum 94]).

La modélisation que nous cherchons à élaborer dans notre étude est dans le but de se rapprocher le plus possible du comportement d'une voiture. La finalité n'est pas de dégager le modèle le plus précis possible en intégrant le maximum de paramètres, mais d'avoir un modèle satisfaisant par sa précision et sa complexité. Avant d'aborder la modélisation cinématique et dynamique du véhicule, nous allons présenter dans ce qui suit quelques caractéristiques essentielles d'une voiture automobile.

2.2 Caractérisation d'un véhicule

Nous pouvons citer les principaux organes mécaniques d'un véhicule à savoir : la masse suspendue, les trains avant et arrière, les suspensions, les roues, l'organe de direction, l'organe de propulsion, l'organe de freinage et les différents organes de transmission [Chagette 77]. Ils permettent de qualifier le véhicule et de le différencier d'un autre de par sa géométrie et sa mécanique. Nous allons maintenant aborder la caractérisation d'un véhicule à travers les caractéristiques du contact roues-sol ainsi que du pneumatique.

2.2.1 Caractéristiques du contact roues-sol

Les caractéristiques du contact roues-sol sont les principales conditions du mouvement qui définissent le roulement ou le glissement. En fonctionnement normal, la roue d'un véhicule tourne en adhérant sur le sol, comme elle peut glisser et perdre son adhérence. A partir de ce fonctionnement on peut déduire les conditions de propulsion donnant les limites dans lesquelles doit se situer la force de propulsion. Ainsi, on définit les deux grandeurs physiques suivantes : la résistance au roulement et la résistance au glissement. La force de propulsion F_p qui doit être appliquée pour que la voiture démarre sans glisser, doit être comprise entre la force de résistance au glissement F_{rg} , et la force de résistance au roulement F_{rr} , telle que :

$$F_{rr} < F_p < F_{rg} \quad (2.1)$$

avec :

$$\begin{cases} F_{rr} = P_t \lambda_1 \\ F_{rg} = P_m \lambda_2 \end{cases} \quad (2.2)$$

sachant que P_t est le poids total du véhicule, λ_1 est le coefficient de frottement qui dépend de la nature du sol, de l'état du bandage et de la pression de gonflage du pneumatique et de la vitesse de déplacement, P_m est le poids supporté par les roues motrices soumises à l'effort et λ_2 est le coefficient de frottement au glissement qui est fonction du bandage du pneumatique et de l'état du sol.

Ces caractéristiques dépendent du pneumatique des roues qui est l'une des principales composantes du véhicule représentant l'interface entre celui-ci et l'environnement extérieur. Il a pour rôle d'assurer la transmission de l'effort de propulsion, de freinage et de guidage. Son comportement est en revanche non-linéaire et complexe.

2.2.2 Caractéristiques du pneumatique

La structure souple du pneu engendre des forces de réaction du sol sur la roue, dues aux différentes flexibilités influant sur la dynamique du véhicule. Chaque flexibilité est définie comme le rapport entre le déplacement du centre de la roue suivant l'axe en question et l'effort appliqué sur cet axe.

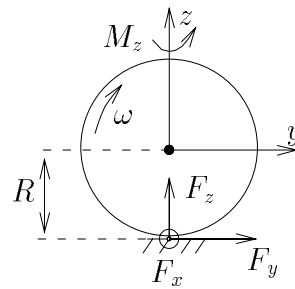


FIGURE 2.1 – Forces et moments du pneumatique.

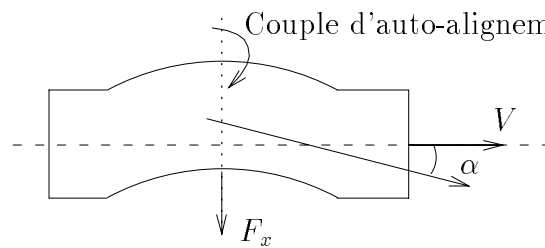
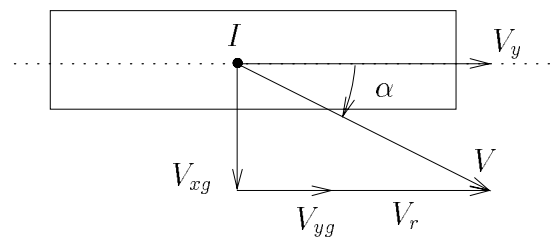


FIGURE 2.2 – Angle de glissement et force latérale d'une roue.

FIGURE 2.3 – Les vitesses de glissement roue-sol ($V_{I \in \text{roue/sol}}$) d'un point I du pneu.

On peut citer :

- la flexibilité verticale agissant sur le confort et l'adhérence au sol,
- la flexibilité transversale, origine du phénomène de dérive,
- la flexibilité longitudinale origine du glissement,

- la flexibilité torsionnelle origine du couple d'auto-alignement.

La tenue de route du véhicule est influencée par la catégorie du pneumatique utilisé et du véhicule en lui-même [Wade-Allen 86]. Les différentes actions et réactions supportées par la roue sont mentionnées sur la figure 2.1, ω est la vitesse de rotation de la roue, R est son rayon effectif, F_x , F_y et F_z sont les différentes forces engendrées. On distingue les forces d'action liées au poids supporté par le pneu, de celles de réaction liées au contact du sol. Les forces de réaction sont constituées par une force de réaction verticale due au poids de la roue chargée et par des forces de réaction horizontales, l'une longitudinale et l'autre latérale. De plus, un couple d'auto-alignement agit autour de l'axe vertical de la roue (voir Figure 2.2), tels que α est l'angle de glissement, F_x est la force latérale de glissement, et V est la vitesse de déplacement de la roue.

Il est à noter que des forces et des couples sont engendrés lors de la déformation du pneu en cours du mouvement (réaction du sol sur la roue) et caractérisent le glissement. Ce dernier résulte de la flexibilité du pneumatique et est composé d'un glissement longitudinal et d'un glissement latéral. La figure 2.3 représente les différentes vitesses mises en jeu lors d'un glissement et permettent de l'exprimer. On note par V_y la projection de la vitesse sur l'axe y , V_{xg} est la vitesse de glissement selon x , V_{yg} est celle selon y et V_r est la vitesse déduite de la vitesse de rotation de la roue.

Une synthèse des différentes études sur le pneumatique est présentée dans [Pacejka 91]. Un modèle appelé «*formule magique*» est établi à partir de la forme sinusoïdale des forces et du couple du pneumatique en fonction de son angle de glissement. Ce modèle permet de reconstruire les forces du pneumatique à partir des différents glissements.

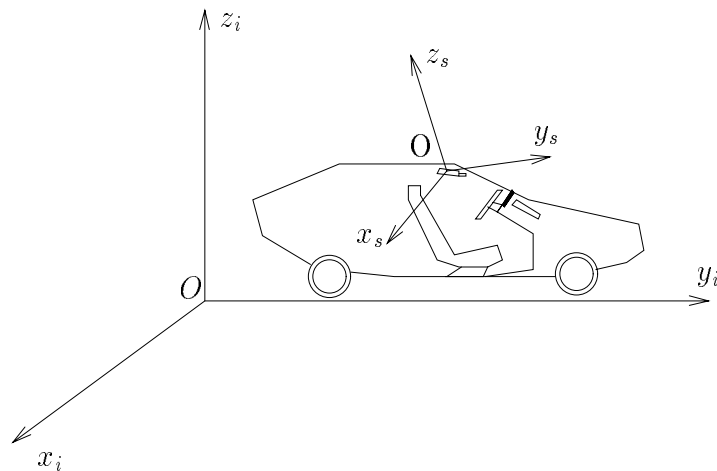


FIGURE 2.4 – Repère inertiel et repère du solide fixé au véhicule.

2.3 Modèle cinématique

D'une manière générale, tout corps rigide se déplaçant dans l'espace est animé de six degrés de liberté, trois en translation et trois en rotation. Dans notre cas, nous considérons le véhicule comme un corps muni d'un repère $R_s = (O, x_s, y_s, z_s)$ ayant un mouvement plan, auquel on associe un repère inertiel de positionnement $R_i = (O, x_i, y_i, z_i)$ (voir Figure 2.4).

Il est utile d'approcher la cinématique du mécanisme de la direction en considérant que les deux roues avant tournent légèrement de façon différentielle. Ensuite, le centre de rotation instantané peut être purement déterminé par des relations cinématiques. En pratique, chaque roue suit une courbure distincte et possède ainsi une vitesse différente. Néanmoins, la vitesse de référence à suivre est donnée pour un point particulier, généralement choisi sur l'axe longitudinal et correspond au point de contrôle. En outre, les angles de braquage des roues avant ne sont pas aisément mesurables vu la difficulté d'installation des capteurs. Cela revient à supposer que le mécanisme de la direction est le même que celui d'une bicyclette placée sur l'axe longitudinal. Celui-ci est non seulement plus pratique à manipuler mais s'avère aussi suffisant pour la plupart des mises en œuvre de guidage-pilotage.

Nous allons maintenant élaborer le modèle cinématique complet en considérant un comportement bicyclette à deux degrés de liberté. Commençons d'abord par dégager l'équation de l'orientation en lacet.

Equation de l'orientation : soit un point de contrôle situé au milieu de l'essieu arrière, muni d'un vecteur vitesse angulaire $\dot{\psi}$, dirigé le long de l'axe z , et d'un vecteur vitesse linéaire $\dot{x}$, dirigé le long de l'axe x (voir la Figure 2.5). En utilisant l'approximation du modèle bicyclette, l'angle de direction δ et le rayon de courbure r de la trajectoire du véhicule, sont reliés à la distance entre l'essieu avant et l'essieu arrière L par :

$$\tan \delta = \frac{L}{r} \quad (2.3)$$

Nous montrons sur la figure 2.6, une portion d'un cercle ΔS représentant la trajectoire prise par le véhicule. Nous supposons que le véhicule se déplace par des petits mouvements entre un point initial d'abscisse curviligne S_0 et un point final d'abscisse S_f tel que :

$$\frac{1}{r} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi}{\Delta S} = \frac{d\psi}{dS} = \frac{d\psi}{dt} \frac{dt}{dS} \quad (2.4)$$

avec ψ l'orientation du véhicule (voir la Figure 2.6).

La dérivée de S englobe la vitesse longitudinale le long de l'axe y et la vitesse latérale le long de l'axe x de sorte que :

$$\frac{dS}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} \quad (2.5)$$

En fait, la vitesse de rotation est obtenue en combinant les équations (2.3), (2.4) et (2.5). On obtient :

$$\dot{\psi} = \frac{\tan \delta}{L} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (2.6)$$

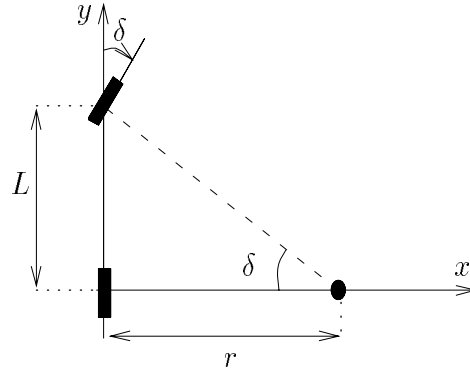


FIGURE 2.5 – *Modèle bicyclette.*

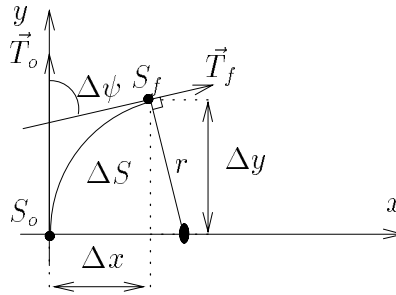


FIGURE 2.6 – *Trajectoire curviligne du véhicule entre deux positions S_o et S_f .*

Nous allons à présent nous intéresser aux équations représentant la position du véhicule dans le plan.

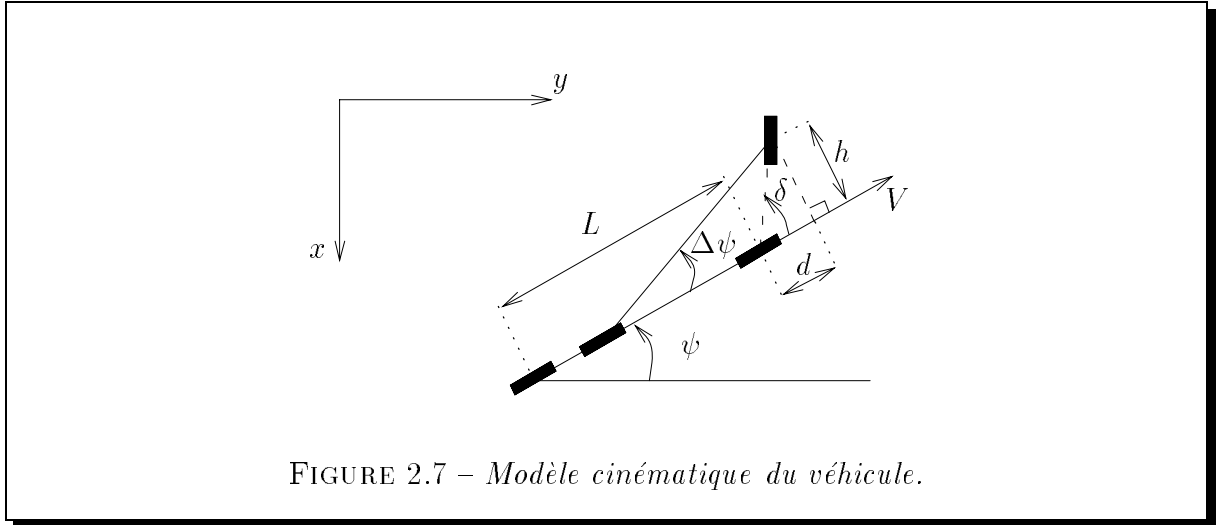
Equations de la position : nous supposons que le véhicule effectue des petits mouvements rectilignes uniformes. Afin d'élaborer ces équations simplifiées, nous traitons les deux types de mouvements (en translation et en rotation) entre deux instants t et $t + \Delta t$. Dans le cas où l'on considère un mouvement de translation seul à vitesse constante pendant un laps de temps Δt , le véhicule se déplace d'une distance notée $d = V\Delta t$ (voir

Figure 2.7). Nous exprimons :

$$\begin{cases} \sin \psi = -\frac{x_{t+\Delta t} - x_t}{d} = -\frac{\dot{x}}{V} \\ \cos \psi = \frac{\dot{y}}{V} \end{cases} \quad (2.7)$$

L'approximation aux petits angles nous permet d'exprimer la relation entre l'angle de la direction δ et la vitesse de la déviation latérale $\dot{\psi}$, ainsi que la relation entre la différentielle de la coordonnée latérale x du centre de l'essieu arrière du véhicule en fonction de la déviation latérale ψ comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = -V\psi \\ \dot{\psi} = \frac{V}{L}\delta \end{cases} \quad (2.8)$$



2.4 Modèle dynamique

Il existe un nombre important de méthodes pour établir les équations dynamiques d'un système mécanique. Il y a des méthodes de formulation dites classiques ainsi que des méthodes utilisant une formulation à l'aide des groupes de Lie [Mizzi 92]. Dans les méthodes classiques, on retrouve, sans être exhaustif, trois formulations : emploi des théorèmes généraux de la mécanique, la méthode utilisant les équations de Lagrange [Dombre 88] et l'emploi du principe des travaux virtuels (ou d'Alembert) .

La formulation générale des équations dynamiques est donnée par [?], [Samson 91b], [Canudas de Wit 96] :

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau \quad (2.9)$$

où $H(q)$ est une matrice d'inertie du robot qui doit être définie symétrique et positive, et $C(q, \dot{q})$ est le terme tenant compte des forces centrifuges et de coriolis.

Dans notre cas, on utilise une formulation classique basée sur les théorèmes généraux de la mécanique s'appuyant sur l'emploi du principe fondamental de la dynamique. On considère un mouvement en lacet du véhicule afin d'élaborer le modèle correspondant. Pour cela, nous explicitons tout d'abord les équations du mouvement d'un corps dans le cas général, ensuite nous donnons le bilan des forces mises en œuvre, à partir desquelles nous dégageons le modèle en question.

2.4.1 Equations du mouvement

Le mouvement d'un corps rigide possède six degrés de liberté dynamiques : trois translations définissant la localisation de l'objet, et trois rotations définissant son orientation. Puisque chaque degré de liberté prend deux variables d'état, une pour la position et une autre pour la vitesse, nous avons donc besoin de douze équations différentielles du premier ordre pour décrire le mouvement de l'objet. Mais dans la pratique, seules quelques-unes d'entre elles sont nécessaires, et ceci dépend de la spécificité du modèle du système. Le mouvement d'un corps rigide est gouverné par les équations de *Newton* suivantes :

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{f} \quad (2.10)$$

$$\frac{d\vec{h}}{dt} = \vec{\tau} \quad (2.11)$$

où $\vec{P}$ est le moment linéaire du corps solide, $\vec{h}$ est le moment cinétique du corps solide, $\vec{f}$ est la force appliquée sur le corps et $\vec{\tau}$ est le couple appliqué sur le corps solide.

Les rotations dynamiques d'un corps rigide sont plus compliquées que les translations dynamiques pour plusieurs raisons : la masse M d'un corps rigide est un scalaire, en revanche le moment d'inertie I est une matrice 3×3 . Si les axes du corps sont choisis de façon à ce qu'ils coïncident avec les axes principaux, la matrice des moments d'inertie est dans ce cas diagonale. La difficulté réside dans la description de la position et de l'orientation du corps dans l'espace. Pour déterminer l'orientation du corps dans l'espace, nous pouvons définir trois axes (x_s, y_s, z_s) fixés au corps solide du véhicule (voir Figure 2.4). En effet, pour déterminer cette orientation il suffit d'exprimer la relation qui lie les angles des axes du corps et ceux du référentiel inertiel (x_i, y_i, z_i) . Dans cet objectif, nous allons considérer la séquence de rotations, schématisées sur la figure 2.8 et formée afin de ramener les axes du corps solide dans une position générale quelconque. On définit pour cela les différentes rotations suivantes (voir Figure 2.8) : ψ (lacet) est une rotation autour de l'axe z , β (roulis) est une rotation autour de l'axe y et α (tangage) est une rotation autour de l'axe x .

Nous avons pour chaque rotation les relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ z_{s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} x_{s2} \\ y_{s2} \\ z_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ z_{s1} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} x_{s3} \\ y_{s3} \\ z_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s2} \\ y_{s2} \\ z_{s2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Ainsi, nous remarquons que :

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = T_{si} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

où T_{si} est la matrice de rotation des axes du corps à partir du repère position, produit de trois matrices écrites précédemment.

$$T_{si} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Par l'application des équations de *Newton-Euler* de rotation, nous pouvons écrire [Dombre 88], [Samson 91b] :

$$\begin{cases} I_x \dot{\omega}_{xs} + (I_z - I_y) \omega_{ys} \omega_{zs} = \tau_{xs} \\ I_y \dot{\omega}_{ys} + (I_x - I_z) \omega_{zs} \omega_{xs} = \tau_{ys} \\ I_z \dot{\omega}_{zs} + (I_y - I_x) \omega_{xs} \omega_{ys} = \tau_{zs} \end{cases} \quad (2.17)$$

ou encore en simplifiant les notations par :

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \frac{L}{I_x} - \frac{I_z - I_y}{I_x} qr \\ \dot{\omega}_y = \frac{M}{I_y} - \frac{I_x - I_z}{I_y} pr \\ \dot{\omega}_z = \frac{N}{I_z} - \frac{I_y - I_x}{I_z} pq \end{cases} \quad (2.18)$$

où L , M et N sont des couples de force par rapport aux axes de la voiture (couples de roulis, de tangage et de lacet).

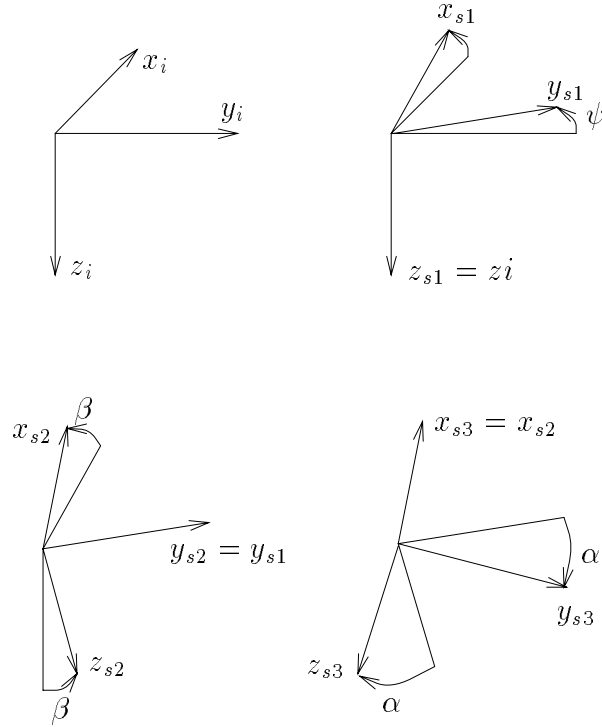


FIGURE 2.8 – Séquence de rotations (roulis, tangage et lacet).

Dans le but de définir complètement l'orientation du solide, nous avons besoin de relier les différents angles de rotation α, β et ψ aux différentes vitesses angulaires. Un moyen d'obtenir ces relations est de passer par les deux équations (2.16) et (2.18). On trouve :

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \omega_x + (\omega_y \sin \alpha + \omega_z \cos \alpha) \tan \alpha \\ \dot{\beta} = \omega_y \cos \alpha - \omega_z \sin \alpha \\ \dot{\psi} = (\omega_x \sin \alpha + \omega_z \cos \alpha) / \cos \beta \end{cases} \quad (2.19)$$

Ce sont des équations non-linéaires qui décrivent la dynamique du corps solide.

Le moment linéaire exprimé dans le repère inertiel est :

$$\vec{P} = M\vec{V}_i = MT_{is}\vec{V}_s \quad (2.20)$$

tel que $\vec{V}_s = (u \ v \ w)^T$ est le vecteur vitesse par rapport au repère mobile et M est la masse du véhicule. En utilisant les équations (2.10) et (2.20), on obtient :

$$\vec{V}_s = -T_{si}\dot{T}_{is}\vec{V}_s + \frac{1}{M}\vec{f}_s \quad (2.21)$$

où $\vec{f}_s = T_{si}\vec{f}_i$ est le vecteur composé de la somme des forces appliquées sur la voiture dans le repère mobile.

On aboutit aux équations fondamentales de la dynamique pour la translation suivantes :

$$\begin{cases} \dot{u} = \omega_z v - \omega_y w + \frac{1}{M} f_{sx} \\ \dot{v} = -\omega_z u + \omega_x w + \frac{1}{M} f_{sy} \\ \dot{w} = \omega_y u - \omega_x v + \frac{1}{M} f_{sz} \end{cases} \quad (2.22)$$

Trois autres équations complètent la modélisation du véhicule. Il s'agit des équations régissant le mouvement du véhicule dans le repère inertiel. Elles sont facilement exprimées par :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = T_{is} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Le développement du calcul nous conduit à :

$$\begin{cases} \dot{x} = uC_\beta C_\psi + v(S_\beta S_\alpha C_\psi - S_\psi C_\beta) + w(C_\psi S_\beta C_\alpha + S_\psi S_\alpha) \\ \dot{y} = uC_\beta S_\psi + v(S_\beta S_\alpha S_\psi + C_\psi C_\alpha) + w(S_\psi S_\beta C_\alpha - C_\psi S_\alpha) \\ \dot{z} = -uS_\beta + vC_\beta S_\alpha + wC_\beta C_\alpha \end{cases} \quad (2.24)$$

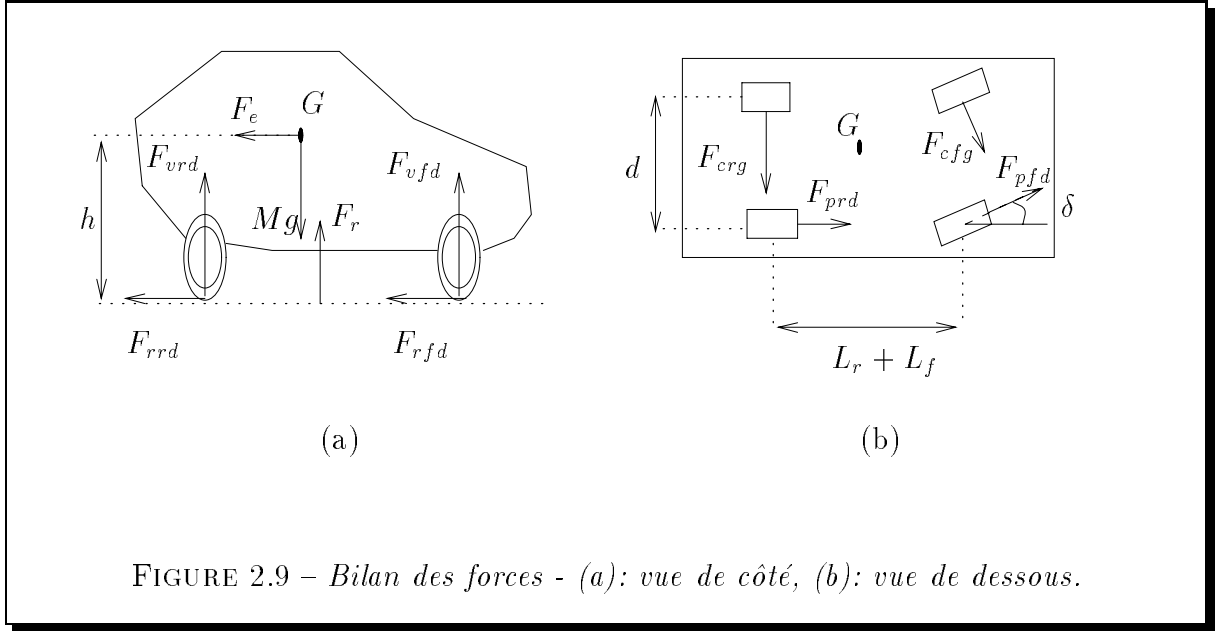
On note C_i et S_i respectivement le cosinus et le sinus de l'angle i .

2.4.2 Bilan des forces

La figure 2.9 nous servira de base pour illustrer les différentes forces mises en évidence dans le cas de notre modélisation. Nous distinguons deux types de forces : les forces actives et les forces réactives. Nous considérons les différentes forces mentionnées sur la figure 2.9 telles que :

- F_{rij} sont les forces de résistance au roulement,
- F_{vij} sont les forces de réaction verticales,
- Mg est le poids,
- F_e est la résultante des forces extérieures en longitude y ,
- F_r est la résultante des forces extérieures selon z ,
- F_{cij} sont les forces centripètes,
- F_{pij} sont les forces de propulsion avec ($i = r, f$ et $j = g, d$)

Nous exprimons, dans ce qui suit, chacune des forces définies ci-dessus.



2.4.2.1 Forces actives

Les forces actives sont à l'origine du mouvement du véhicule. On distingue celles qui sont dues au moteur de celles dues au système de freinage. De plus, lorsque le conducteur agit sur le volant, il induit au niveau des roues des forces qui sont à l'origine du mouvement latéral.

Force de propulsion : la force de traction F_t du pneumatique est une force transmise à la roue motrice. Elle est générée par l'application d'un couple moteur autour du centre de la roue. La force de freinage F_f est issue du couple généré par le système de freinage sur l'axe de la roue. Ce couple de force est transmis aux quatre roues du véhicule avec un coefficient de répartition de freinage k_f ($0 < k_f < 1$) entre les roues avant et arrière du véhicule. Ce coefficient, déterminé par le constructeur, a pour rôle de répartir le freinage de manière à assurer la stabilité du véhicule. Dans le cas d'un véhicule à train moteur avant, et avec l'hypothèse d'une répartition symétrique des forces entre les roues d'un même train, nous pouvons écrire les deux forces F_{pf} et F_{pr} appliquées respectivement aux roues avant et arrière de la manière suivante :

$$\begin{cases} F_{pf} &= F_t - k_f F_f = F_{pfg} + F_{pfd} \\ F_{pr} &= -(1 - k_f) F_f = F_{prg} + F_{prd} \end{cases} \quad (2.25)$$

avec $F_{pi} = 2F_{pij}$ tels que $i = f, r$ afin de différencier la force de propulsion de la roue avant et arrière et $j = g, d$ pour distinguer la force de la roue gauche de celle de droite. Ces forces sont normalement dépendantes du mouvement de roulis car ce phénomène génère

un transfert de charge et donc les forces développées par les pneumatiques d'un même train sont différentes.

Forces de direction : le volant est l'élément de direction à partir duquel le conducteur peut agir sur le véhicule. La variation de sa position est transmise aux roues du train directeur avec un coefficient de démultiplication due à la mécanique de transmission. Le mouvement du volant induit une force latérale qui modifie le déplacement du véhicule (voir Figure 2.10).

La déformation due aux propriétés élastiques du pneu crée l'angle de dérive permettant de déterminer cette force. Les angles de dérive avant et arrière sont déterminés à partir de l'angle de braquage des roues (voir Figure 2.11), de l'angle formé par le rapport des vitesses latérales et longitudinales, et de l'angle de roulis dans le cas où la masse suspendue est considérée indépendamment de la masse totale. Le roulis a un effet sur la stabilité du véhicule et donc ajoute un terme à l'expression des angles de glissement. Les expressions des angles de glissement avant et arrière pour ce modèle peuvent être déterminées à partir de la vitesse longitudinale v , latérale u , de la vitesse angulaire autour de l'axe vertical r et de sa géométrie propre. Ainsi, avec une approximation trigonométrique linéaire sur l'angle de braquage α , nous avons :

$$\begin{cases} \alpha &= -\frac{u}{v} \\ \alpha_f &= -\frac{u}{v} + \frac{rL_f}{v} - \delta \\ \alpha_r &= -\frac{u}{v} - \frac{rL_r}{v} \end{cases} \quad (2.26)$$

Son expression est une fonction de l'angle de dérive α_i tels que α_f pour la roue avant et α_r pour la roue arrière. Sur la figure 2.11 nous avons représenté les différentes grandeurs citées ci-dessous :

- v est la vitesse longitudinale dans le repère mobile,
- u étant la vitesse latérale,
- r est la vitesse de rotation de x vers y ,
- F_{cfd} est la force centripète de la roue avant droite,
- F_{crd} étant celle de la roue arrière droite.

On exprime mathématiquement les forces centripètes à l'aide des coefficients de raideur de dérive C_f et C_r (N/rd):

$$F_{ci} = \mu C_i \alpha_i \quad (2.27)$$

avec $F_{ci} = 2F_{cij}$ pour tout $(i = f, r)$ et $(j = d, g)$, C_i est le coefficient de raideur au couple d'auto-alignement sur chaque roue variable avec la charge, la pression et la structure du pneu, et μ est le coefficient de frottement des pneus. Dans le cas du lacet, ce couple n'intervient pas.

Poids du véhicule : la force due à la masse du véhicule est une force statique verticale, appliquée au centre de gravité. Elle dépend de la masse propre du véhicule et de la charge supplémentaire due aux passagers et au chargement. Son expression classique est donnée par :

$$P = Mg \quad (2.28)$$

telles que M est la masse totale du véhicule et g étant l'accélération due à la pesanteur (orientée dans le sens opposé à l'axe z).

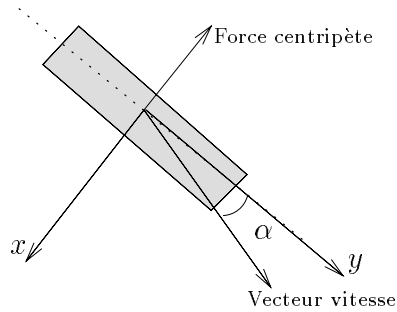


FIGURE 2.10 – Force latérale sur le pneumatique - α est l'angle de dérive.

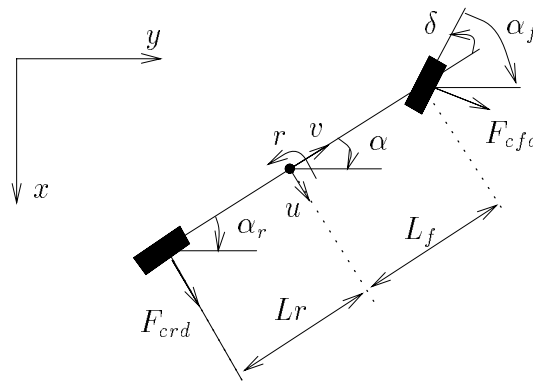


FIGURE 2.11 – Angles de dérive en mouvement de lacet.

2.4.2.2 Forces réactives

Ces réactions sont le résultat des actions sur le véhicule. Il s'agit du couple d'auto-alignement, des forces verticales de réaction, des forces de résistance au roulement et des

forces dues à l'effet de l'aérodynamisme.

Forces de réactions verticales : l'action de la masse de l'automobile et les effets de transfert de charge dus aux inerties entraînent des réactions sur chacune des roues. Ces réactions permettent d'évaluer la force de résistance au roulement ainsi que la force développée par chaque roue. Pour déterminer les forces de réaction verticales, on exprime les moments par rapport aux axes joignant les roues d'un même côté. Explicitons les moments des forces agissant sur la roue avant droite par rapport aux différents axes. Traitons les cas séparément [Nalecz 89] [Metz 89] :

1. La somme des moments des forces aux points de contact des roues avant $\sum M_{fy}$ et arrières $\sum M_{ry}$ avec le sol, selon l'axe longitudinal y du véhicule sont donnés par :

$$\begin{cases} \sum M_{ry} = F_{vf}(L_f + L_r) + h \left[M(\dot{v} + ur) - F_e \right] \\ \sum M_{fy} = -F_{vr}(L_f + L_r) + h \left[M(\dot{v} + ur) - F_e \right] \end{cases} \quad (2.29)$$

2. La somme des moments des forces aux points de contact des roues gauches $\sum M_{gx}$ et droites $\sum M_{dx}$ avec le sol, qui agissent suivant l'axe de déplacement latéral x , sont donnés par :

$$\begin{cases} \sum M_{gx} = (F_{vfd} + F_{vrd})d - hM(\dot{u} - vr) \\ \sum M_{dx} = -(F_{vfg} + F_{vrg})d - hM(\dot{u} - vr) \end{cases} \quad (2.30)$$

3. Les moments des forces qui agissent suivant l'axe vertical du véhicule z aux points de contact des roues avants $\sum M_{fz}$ et arrières $\sum M_{rz}$ sont donnés par :

$$\begin{cases} \sum M_{rz} = F_{vf}(L_f + L_r) + L_r(Mg - F_r) \\ \sum M_{fz} = -F_{vr}(L_f + L_r) + L_r(Mg - F_r) \end{cases} \quad (2.31)$$

Nous considérons une symétrie entre la partie droite et la partie gauche de l'automobile. Ainsi, la force de réaction à l'avant F_{vf} est divisée par deux pour obtenir la force de réaction avant droite due aux forces qui agissent suivant les axes y et z . En revanche, pour les forces qui agissent suivant l'axe x , la force de réaction droite ($F_{vrd} + F_{vfd}$) est répartie à l'avant en utilisant le principe des bras de levier. On trouve :

$$F_{xfd} = -\frac{L_r}{L_f + L_r} \frac{hM(\dot{u} - vr)}{d} \quad (2.32)$$

qui exprime la force de réaction verticale avant droite par rapport à l'axe y . Finalement, la somme des trois forces de réactions (2.29), (2.31) et (2.32) donne la force de réaction avant droite F_{vfd} . En résumé, nous exprimons les différentes forces de réaction verticales

comme suit :

$$\begin{cases} F_{vrd} &= -\frac{L_f(Mg-F_r)}{2(L_f+L_r)} - \frac{L_f h M(\dot{u}-vr)}{d(L_f+L_r)} + \frac{h[M(\dot{v}+ur)-F_e]}{2(L_f+L_r)} \\ F_{vrg} &= -\frac{L_f(Mg-F_r)}{2(L_f+L_r)} + \frac{L_f h M(\dot{u}-vr)}{d(L_f+L_r)} + \frac{h[M(\dot{v}+ur)-F_e]}{2(L_f+L_r)} \\ F_{vfd} &= -\frac{L_r(Mg-F_r)}{2(L_f+L_r)} - \frac{L_f h M(\dot{u}-vr)}{d(L_f+L_r)} - \frac{h[M(\dot{v}+ur)-F_e]}{2(L_f+L_r)} \\ F_{vfg} &= -\frac{L_r(Mg-F_r)}{2(L_f+L_r)} + \frac{L_f h M(\dot{u}-vr)}{d(L_f+L_r)} - \frac{h[M(\dot{v}+ur)-F_e]}{2(L_f+L_r)} \end{cases} \quad (2.33)$$

Forces de résistance au roulement : le déplacement du véhicule est freiné par des forces de frottement dues à son propre poids. Les forces de résistance aux roulement F_{ri} ($i = f, r$) agissent dans le sens opposé au déplacement dépendent de la valeur des forces de réaction des roues et s'expriment comme suit :

$$F_{ri} = kF_{vi} \quad (2.34)$$

sachant que F_{vi} avec ($i = f, r$) représente la somme des réactions verticales relatives aux roues avant et arrière et que k étant le coefficient de résistance au roulement constant, influencé par l'état de la route, la géométrie, l'état du pneumatique ainsi que sa vitesse. On note :

$$\vec{F}_{vi} = \sum_j F_{vij} \quad (2.35)$$

tel que $j = g, d$ pour les roues gauches et droites.

La traînée : il résulte du déplacement du véhicule dans l'air immobile ou en mouvement une force aérodynamique contraire au sens du déplacement relatif du véhicule par rapport à l'air. Le point d'application de ces forces et moments résistants est différent du centre de masse du véhicule puisqu'il se situe en général sur la carrosserie. Nous simplifions notre étude pour ne considérer que la traînée. Cette force est dirigée le long de l'axe longitudinal du repère lié au véhicule. Son expression est la suivante :

$$F_e = \frac{1}{2} \rho C_x S v^2 = k_2 v^2 \quad (2.36)$$

avec S est l'aire résistante, C_x est le coefficient de résistance, ρ est la masse volumique de l'air et v est la vitesse relative entre le véhicule et le vent.

2.4.3 Modèle du lacet

La voiture a été assimilée à une masse en contact avec le sol par le biais des roues. Les forces externes (contact des pneus, résistance aérodynamique) ont été choisies très simples. Nous considérons ici que le véhicule se déplace sur une route nivelée. Néanmoins, l'environnement dans lequel il évolue peut influencer sur son comportement.

Le modèle considère le déplacement longitudinal et latéral, ainsi que la rotation avec un angle de lacet. Les vitesses sont alors : la vitesse longitudinale v , la vitesse latérale u et la vitesse de rotation r autour de l'axe z . Le véhicule est assimilé à un corps solide et le contact des pneus à des points. Nous supposons aussi une équi-répartition des charges ainsi qu'une symétrie par rapport à l'axe vertical. Nous utilisons les équations exprimées dans un cadre général pour aboutir à des équations réduites au mouvement de lacet (latéral et longitudinal) pour lesquelles on applique le principe fondamental de la dynamique en réécrivant simplement l'équation (2.22) :

$$\begin{cases} \sum F_{xs} = M(\dot{u} - vr) \\ \sum F_{ys} = M(\dot{v} + ur) \\ \sum M_{zs} = I_z \dot{r} \end{cases} \quad (2.37)$$

Le modèle en question est exprimé en injectant toutes les forces mises en jeu dans les équations de la dynamique (2.37). On en déduit :

$$\begin{cases} \sum \vec{F}_{xv} = (F_{pf} - F_{vf}) \sin \delta + F_{cf} \cos \delta + F_{cr} \\ \sum \vec{F}_{yv} = F_{pr} - F_{vr} + (F_{pf} - F_{vf}) \cos \delta + F_{cf} \sin \delta - F_e \\ \sum M_z = L_r F_{cr} - L_f \left[F_{cf} \cos \delta + (F_{pf} - F_{vf}) \sin \delta \right] + \frac{d}{2} (F_{prd} - F_{prg} - F_{vrd} + F_{vrg}) \\ \quad + \frac{d}{2} \left[(F_{prd} - F_{prg} - F_{vrd} + F_{vrg}) \cos \delta + (F_{cfg} - F_{cfd}) \sin \delta \right] \end{cases} \quad (2.38)$$

avec :

$$\begin{cases} F_{pr} = -(1 - k_f) F_f \\ F_{vr} = k(F_{vrg} + F_{vrd}) \\ F_{pf} = F_t - k_f F_f \\ F_{vf} = k(F_{vfg} + F_{vfd}) \\ F_{cf} = \mu C_f \alpha_f \\ F_{cr} = \mu C_r \alpha_r \\ F_e = \frac{1}{2} \rho C_x v^2 = k_2 v^2 \end{cases} \quad \begin{cases} F_r = k_1 v^2 \\ F_{prd} = F_{prg} = \frac{1}{2} (1 - k_f) F_f \\ F_{vrd} = -\frac{L_f (Mg - F_r)}{2(L_f + L_r)} - \frac{L_f h M(\dot{u} - vr)}{d(L_f + L_r)} + \frac{h[M(\dot{v} + ur) - F_e]}{2(L_f + L_r)} \\ F_{vrg} = -\frac{L_f (Mg - F_r)}{2(L_f + L_r)} + \frac{L_f h M(\dot{u} - vr)}{d(L_f + L_r)} + \frac{h[M(\dot{v} + ur) - F_e]}{2(L_f + L_r)} \\ F_{vfd} = -\frac{L_r (Mg - F_r)}{2(L_f + L_r)} - \frac{L_f h M(\dot{u} - vr)}{d(L_f + L_r)} - \frac{h[M(\dot{v} + ur) - F_e]}{2(L_f + L_r)} \\ F_{vfg} = -\frac{L_r (Mg - F_r)}{2(L_f + L_r)} + \frac{L_f h M(\dot{u} - vr)}{d(L_f + L_r)} - \frac{h[M(\dot{v} + ur) - F_e]}{2(L_f + L_r)} \\ F_{cfd} = F_{cfg} = \frac{1}{2} \mu C_f \alpha_f \end{cases} \quad (2.39)$$

Bien que simplifiées, ces équations ne sont pas simples à exploiter. En effet, des non-linéarités sont présentes et peuvent être levées en procédant à quelques simplifications. On adopte l'hypothèse d'un angle de braquage faible afin de pouvoir éliminer les termes trigonométriques ainsi que les produits de termes faibles. Le modèle prend alors une forme

générale en exprimant complètement les équations (2.37) et (2.24) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u} = \frac{1}{M} \left[(u_1 - k_f u_2) u_3 - M v r - \mu C_f u_3 - \mu (C_f + C_r) \frac{u}{v} - (L_r C_r - L_f C_f) \frac{r}{v} \right] \\ \dot{v} = \frac{1}{M} \left[u_1 - u_2 + M u r - M f g - \mu C_f u_3 \frac{u}{v} + \mu L_f C_f u_3 \frac{r}{v} + v^2 (k_1 - k_2) \right] \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \left[L_f (u_1 - k_f u_2) u_3 - M f h v r - \mu C_f L_f u_3 - \mu (L_f C_f - L_r C_r) \frac{u}{v} + \mu (L_f^2 C_f + L_r^2 C_r) \frac{r}{v} \right] \\ \dot{x} = u - v \psi \\ \dot{y} = v + u \psi \\ \dot{\psi} = r \end{array} \right. \quad (2.40)$$

Nous remarquons que ce modèle englobe le mouvement latéral et le mouvement longitudinal. Notons aussi que les variables de contrôle $u_1 = F_t$, $u_2 = F_f$ et $u_3 = \delta$ représentent respectivement l'action sur l'accélération, le freinage et la direction du véhicule.

Du moment que le véhicule se déplace dans un environnement réel, en l'occurrence la route, il est donc nécessaire d'avoir un modèle le caractérisant par rapport au repère de positionnement lié à son environnement. Pour cela, il suffit d'exploiter les expressions de y pour le déplacement longitudinal, x pour le déplacement latéral et ψ pour l'orientation du véhicule. Le modèle peut être exprimé directement dans le repère de positionnement en considérant le comportement de la voiture comme étant neutre et que $C_f L_f - C_r L_r = 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{1}{M} \left[u_1 u_3 + \frac{\mu}{v} (C_f + C_r) \dot{x} - \mu (C_f + C_r) \psi - \mu C_f u_3 \right] \\ \ddot{y} = \frac{1}{M} \left[u_1 - \frac{\mu}{v} C_f u_3 \dot{x} + \mu C_f \psi + \frac{\mu}{v} L_f C_f \dot{\psi} u_3 \right] \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} \left[L_f u_1 u_3 + \frac{\mu}{v} (C_f L_f^2 + C_r L_r^2) \dot{\psi} - \mu C_f L_f u_3 \right] \end{array} \right. \quad (2.41)$$

Ce modèle, de forme plus simple, ne fait intervenir qu'un nombre restreint de coefficients statiques du véhicule et du pneumatique. Les paramètres retenus sont ceux qui possèdent une influence prépondérante dans le mouvement du véhicule. Dans le cadre de notre application de positionnement par rapport à une ligne blanche d'une autoroute, seul le modèle dynamique latéral nous intéresse. Il suffit d'éliminer la variable de contrôle u_1 ainsi que l'équation correspondant au déplacement longitudinal, ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{1}{M} \left[\frac{\mu}{v} (C_f + C_r) \dot{x} - \mu (C_f + C_r) \psi - \mu C_f u_3 \right] \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} \left[\frac{\mu}{v} (C_f L_f^2 + C_r L_r^2) \dot{\psi} - \mu C_f L_f u_3 \right] \end{array} \right. \quad (2.42)$$

2.5 Validation des modèles en simulation

Nous présentons dans cette partie les résultats de simulation des modèles étudiés. La figure 2.12 représente le résultat du test du modèle cinématique régi par les équations (2.7). Il s'agit de faire déplacer le véhicule sur un plan (x, y) pour une durée de $500 \times 40 \text{ ms}$ à différentes vitesses longitudinales (60, 120 et 180 km/h) avec une action constante de six degrés sur les roues directrices. On remarque que dans ces conditions, le modèle cinématique se déplace sur un cercle quelque soit sa vitesse longitudinale.

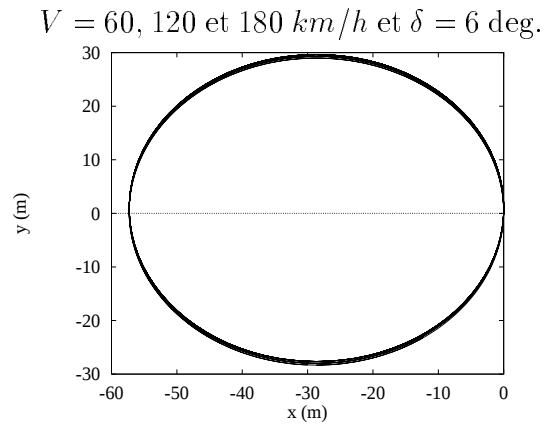
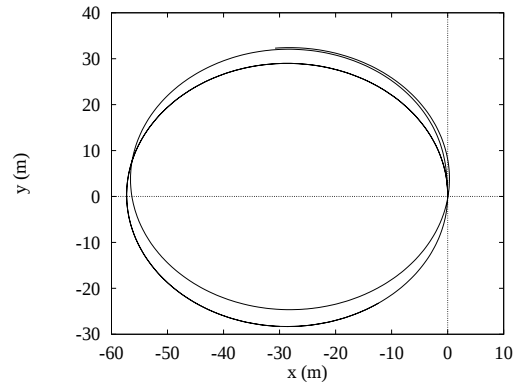
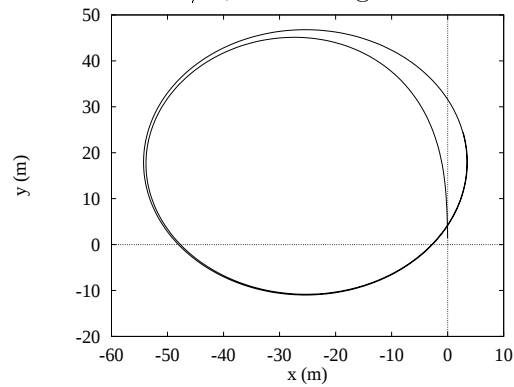
Dans les mêmes conditions que l'essai précédent (angle volant constant), la figure 2.13 présente le test sur le modèle cinématique (équations 2.7) et dynamique (équations 2.42). La vitesse longitudinale du modèle cinématique de 60 km/h est considérée comme une vitesse initiale pour le modèle dynamique. La vitesse latérale de lacet est considérée comme nulle. Nous remarquons que les deux modèles suivent un cercle mais que le modèle dynamique se déplace sur un cercle seulement après une phase d'initialisation. Malgré le fait que les conditions initiales ne soient pas bonnes, le déplacement du véhicule ne diverge pas du cercle qu'il est censé accomplir. Ces mauvaises conditions initiales démontrent l'adéquation du modèle dynamique étudié.

La figure 2.14 présente le test du modèle dynamique (équations 2.42) subissant une action supplémentaire sur l'accélération avec une vitesse initiale de 120 km/h et une force d'accélération de 0.21 g . Nous remarquons que lorsque l'automobile a accompli un tour complet, elle n'est plus au même point qu'au début de la simulation. Ceci s'explique par les conditions initiales qui correspondent à celles d'un déplacement longitudinal, c'est-à-dire avec des vitesses latérales de lacet nulles, ce qui n'est pas juste dans notre test.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation cinématique d'un robot mobile à quatre roues, et à la modélisation dynamique d'un véhicule automobile. Notre objectif n'était pas de faire une analyse et une étude très approfondie des modèles ni de leurs paramètres dynamiques. Néanmoins cette partie est un des maillons de la chaîne d'asservissement que nous traiterons dans les chapitres suivants. Cela est d'autant plus intéressant que les méthodes de commande que nous allons présenter sont basées sur le modèle du système à commander. Nous avons expliqué le fonctionnement des deux modèles et prouvé qu'ils se comportent quasiment de la même manière pour des vitesses faibles, et que dès que les conditions de roulement deviennent importantes, le modèle cinématique peut s'écarter du cas réel.

Dans la suite de notre travail nous ne nous préoccuperons que du modèle latéral car seul l'asservissement latéral est concerné par notre étude.

FIGURE 2.12 – *Test du modèle cinématique.*Vitesse initiale de 60 km/h .FIGURE 2.13 – *Comparaison des modèles cinématique et dynamique sans accélération.* $V = 120 \text{ km/h}$, $\delta = 6 \text{ deg}$ et $F_t = 0.21g$.FIGURE 2.14 – *Test du modèle dynamique avec accélération.*

Chapitre 3

Modélisation de l'interaction vision-commande

*Where there is no vision, the people perish.
Proverb*

Dans ce chapitre, nous traitons de la modélisation de la scène. Auparavant, nous allons étudier les principes de la vision en trois dimensions, notamment les équations de passage entre deux référentiels et la notion de perspective. Ensuite, nous développons deux types de modélisation dans le but de générer des matrices d'interaction qui expriment la relation entre les variations des indices visuels dans l'image et les mouvements de la caméra. Enfin, nous simulons les prises de vue effectuées par une caméra en mouvement en chaque position, grâce à un modèle trois droites à point de fuite, dans le cas d'une scène routière.

3.1 Introduction

De nombreux robots mobiles utilisent la vision afin d'augmenter leur autonomie. Auparavant la vision était utilisée seule, mais depuis peu les systèmes utilisent, par exemple, le sonar pour l'évitement d'obstacles et utilisent la vision pour la localisation ou la détection de route ou de chemin.

L'essentiel des travaux antérieurs, liés aux problèmes du suivi de route dans un environnement extérieur, font appel à la reconstruction de modèles de route 3D, dont beaucoup utilisent une vue monoculaire afin de reconstruire cette structure. Ces systèmes utilisent par exemple, l'extraction des contours de la route, avec quelques contraintes sur sa géométrie. *Waxman* décrit des systèmes pour la reconstruction de la géométrie de la route

en calculant des points sur des segments de la route [Waxman 87]. Dans [Matthew 87] on présente un système simplifié basé sur l'hypothèse que le véhicule et la portion de la route visualisée restent sur le même plan. Ceci est appelé modèle «*flat-earth*». Ce modèle est suffisant pour des routes simples et permet un temps de calcul réduit. Ceci a permis au système de manipuler des routes avec des pentes et vallées, appelé modèle «*hill and dale*» [Turk 87]. Du fait que ce modèle ne tient pas compte de la courbure de la route, DeMenthon dans [de Menthon 87] a proposé un algorithme basé sur la contrainte dite «*zero-bank*» qui autorise des courbures et des pentes mais ne tolère pas un surhaussement de la route (pas de rotation par rapport à son axe longitudinal).

Dans ce contexte applicatif, il existe beaucoup de problèmes qui sont liés à la reconstruction d'un modèle par vision. La critique est que cette technique n'est pas facile à évaluer, de sorte qu'elle devient difficile à mettre en œuvre du point de vue pratique. Formellement, c'est un problème inverse mal posé, car un processus de projection perd déjà de l'information [Poggio 84]. En l'inversant, celui-ci nécessite d'autres hypothèses telle que l'égalité des surfaces, dans le sens où ses solutions ne dépendent pas de façon continue de l'entrée. Ceci réduit souvent le problème de la reconstruction sous forme de contraintes d'optimisation dans l'espace à plusieurs dimensions (voir [Poggio 84] pour des discussions sur les techniques générales d'optimisation en reconstruction). Les équations résultantes sont en général non-linéaires et tendent en effet à être instables [Horswill 94]. L'instabilité veut dire que l'estimation de la structure est très sensible au bruit des mesures dans l'image.

Jusqu'à maintenant, la reconstruction d'un modèle par vision présente des résultats à des degrés de succès variés. Espiau dans ses travaux sur les erreurs en asservissement visuel [Espiau 95] affirme que dans ce cas, un vecteur de mesures extraites des images d'une ou plusieurs caméras est utilisé à chaque instant dans la commande, dans le but d'atteindre une situation donnée dans les images. Il ajoute que dans ce cas, le passage à la reconstruction 3D n'est pas forcément nécessaire. Par ailleurs les méthodes de reconstruction nécessitent un calibrage précis. Dans [Espiau 95], Espiau indique, en étudiant le problème de calibrage des caméras en vision artificielle et plus particulièrement en asservissement visuel, que le calibrage est d'un côté incontournable, du fait que des informations métriques sont indispensables, mais d'un autre côté, c'est un problème délicat de par la relative lourdeur des procédures à mettre en œuvre. De même dans [Yoshimi 95] une étude sur l'utilisation d'une caméra non calibrée est présentée. Il explique que les méthodes de calibrage, pour les tâches d'assemblage par exemple, sont difficiles à interpréter et ne conviennent pas pour la plupart des environnements robotiques. Ces méthodes sont souvent décrites par des équations non-linéaires et nécessitent parfois un soin particulier à l'utilisation.

Pour illustrer notre discussion, on peut imaginer un robot mobile en mouvement. On peut essayer de répondre à une série de questions qu'il pourrait se poser, du genre : *Y-a t-il un obstacle dans mon entourage? Dans quelle direction se trouve le hall? Y-a t-il un espace libre de ce côté?* Ces questions vont varier d'un moment à un autre et d'une situation à une autre, au fur et à mesure que le robot est en mouvement. De plus, on n'a pas besoin

de répondre à la question : *quel est le modèle le plus approprié de l'environnement à l'état actuel?* plutôt que d'utiliser tel modèle afin de répondre à la question concernant sa situation immédiate. En conclusion, pour qu'un système puisse éviter un obstacle, il n'a pas du tout besoin de reconstruire la profondeur de la scène en vue. Il a simplement à reconnaître que la distance par rapport à l'objet décroît à une cadence définie par le temps de réaction du système.

L'étude d'un système de vision nécessite la modélisation de l'observateur et du monde où il se trouve, ainsi que l'analyse de la relation entre l'action et la perception. Pour arriver à cette fin, il est important d'établir les éléments nécessaires de modélisation. Cela passe par la modélisation du capteur de vision (caméra) que nous allons aborder en premier lieu.

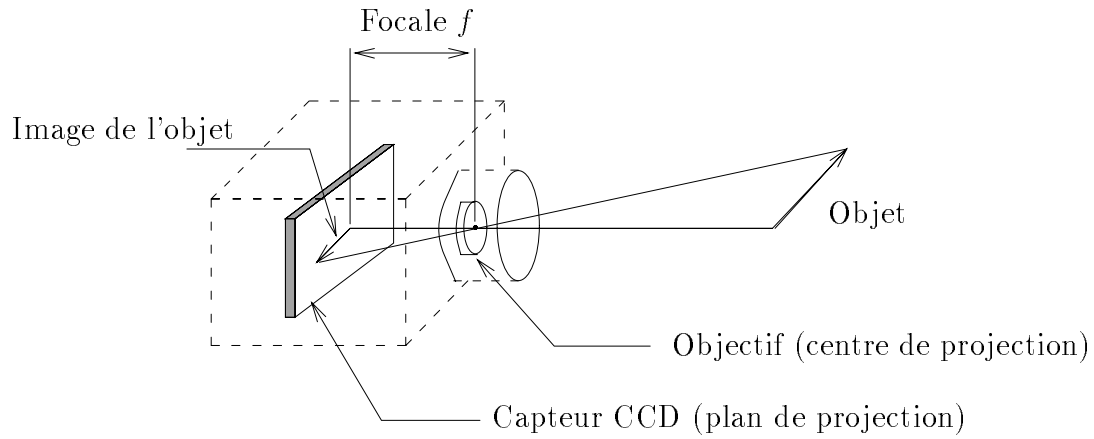
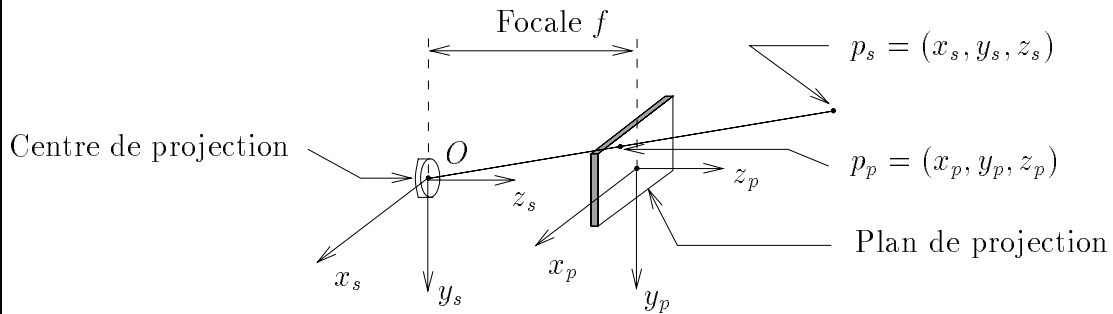
3.2 Modélisation de la caméra

3.2.1 Transformation perspective

La représentation de notre environnement par l'intermédiaire d'une image faite par projection d'une scène sur un plan peut être modélisée par différentes méthodes. La plus simple consiste à ignorer les coordonnées de profondeur de chacun des points de l'environnement. Cela correspond à faire une projection orthographique. Une autre méthode, plus réaliste et plus proche de la vision humaine, consiste à utiliser la projection perspective. Cette projection perspective permet de bien traduire le phénomène de perception visuelle. Commençons par illustrer les différents éléments constituant une caméra CCD (voir Figure 3.1). Elle est composée du centre optique de l'objectif, appelé centre de projection, d'un plan qui contient le capteur, appelé plan de projection, et d'une distance qui sépare le centre de projection du plan de projection qui correspond à la distance focale de l'objectif notée f . Cette modélisation est assimilée à un modèle sténopé.

Le modèle de la figure 3.1 présente l'inconvénient de fournir sur le plan de projection une image inversée de droite à gauche et de bas en haut. Pour éviter cette inversion spatiale, il suffit d'imaginer un plan de projection situé devant le centre de projection comme le montre la figure 3.2. L'image d'un point est ainsi représentée par l'intersection du plan de projection et de la ligne de projection qui joint ce point au centre de projection. On note R_s un repère lié au centre de projection et R_p un repère lié au plan de projection. Ainsi, les relations qui lient la scène au capteur de la caméra sont données par (voir Figure 3.2) :

$$\begin{cases} \frac{x_p}{f} = \frac{x_s}{z_s} \\ \frac{y_p}{f} = \frac{y_s}{z_s} \\ z_p = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

FIGURE 3.1 – *Modélisation de la caméra avec inversion de l'image.*FIGURE 3.2 – *Modélisation de la caméra sans inversion de l'image.*

3.2.2 Coordonnées homogènes

Le passage d'un point objet p_s à un point image p_p se fait grâce aux équations (3.1). Il apparaît que cette transformation, qui n'est pas linéaire, ne permet pas d'utiliser le calcul matriciel. Néanmoins, en utilisant la notion de coordonnées homogènes, il est possible de linéariser ces équations. Pour ce faire, on définit les coordonnées homogènes p_{sh} du point p par $p_{sh} = (\lambda x_s, \lambda y_s, \lambda z_s, \lambda)$, où λ est une constante arbitraire non nulle. Ainsi, pour obtenir les coordonnées de p_p il suffit de prendre les trois premières coordonnées homogènes de p_{sh} et de les diviser par la quatrième. Ce principe est utilisé pour retrouver les équations (3.1) précédemment énoncées. La transformation perspective du repère R_s

vers le repère de projection R_p en coordonnées homogènes est réalisée grâce à la matrice P_c telle que $p_p = P_c p_s$ et que :

$$p_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx_s \\ fy_s \\ 0 \\ z_s \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Notons que si on divise les trois premières coordonnées homogènes de p_p par la quatrième on retrouve les équations précédemment établies. L'utilisation des coordonnées homogènes permet d'obtenir une forme matricielle, mais en contrepartie il y a augmentation de la dimension de l'espace. Cependant, l'équation (3.2) n'est pas encore complète car le repère réel utilise une unité métrique alors que celle utilisée dans le repère de projection est le pixel. La conversion est réalisée par la matrice de conversion d'unités C_u donnée par :

$$C_u = \begin{bmatrix} e_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

e_x est le rapport du nombre de colonnes photo-sensibles du capteur sur la largeur du capteur (en m), e_y est le rapport du nombre de lignes photo-sensibles du capteur sur la hauteur du capteur (en m). En notant $f_x = fe_x$ et $f_y = fe_y$, le point p_p s'exprime par :

$$p_p = P_c C_u p_s = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x x_s \\ f_y y_s \\ 0 \\ z_s \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Une fois la modélisation de la caméra achevée, nous passons à la modélisation de la matrice d'interaction concernant la droite.

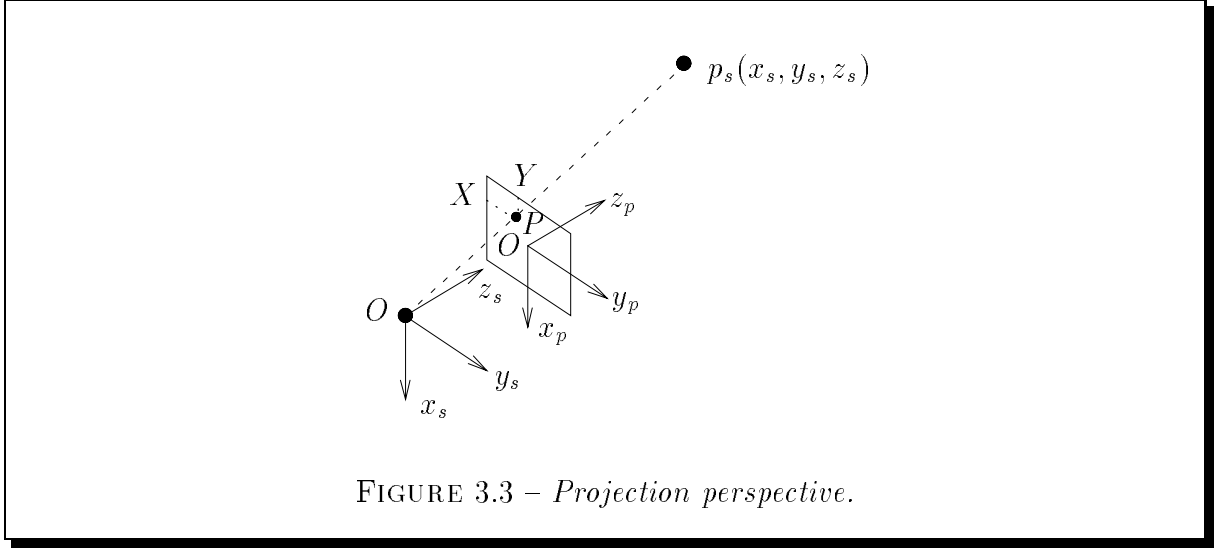
3.3 Torseur d'interaction

Nous développons le problème en considérant que la caméra utilisée est approximée par un modèle *sténopé* classique (voir Figure 3.3) et nous supposons, sans perte de généralité, que la longueur de la focale est égale à l'unité ($f_x = f_y = 1$) [Chaumette 90].

A chaque instant, un point 3D de l'espace $p_s = (x_s, y_s, z_s)$ est projeté dans le plan de l'image en un point $P = (X, Y)$ tels que:

$$\begin{cases} X = x_s / z_s \\ Y = y_s / z_s \end{cases} \quad (3.5)$$

Le vecteur vitesse de la caméra T_c , défini par la vitesse de translation $\underline{V} = (V_x, V_y, V_z)$ et la vitesse de rotation $\underline{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$, correspond au mouvement de l'objet dans la scène 3D.



Ces vitesses peuvent être exploitées au moyen de la relation de la mécanique suivante :

$$\dot{p}_s = -\underline{V} - \underline{\Omega} \wedge p_s \quad (3.6)$$

En calculant la différentielle de l'équation (3.5) et utilisation de (3.6), nous obtenons l'équation relative à la mesure du *flot optique* de l'objet 3D et du mouvement dans la scène suivante :

$$L_{of} = \begin{pmatrix} -1/z & 0 & X/z & XY & -(1+X^2) & Y \\ 0 & -1/z & Y/z & 1+Y^2 & -XY & -X \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Cette équation nous donne une relation d'interaction entre le monde 2D (plan de l'image) et le monde 3D (repère de l'objet) dans le cas d'un point. Dans le cas d'une autre primitive telle que la droite, une méthode générale est appliquée afin d'exprimer la matrice d'interaction correspondante. En général, une primitive géométrique 3D peut être représentée par une fonction vectorielle comme suit :

$$h(x, y, z, Q_i) = 0 \quad (3.8)$$

Celle-ci est projetée dans le repère image et représentée par une autre fonction vectorielle sous la forme :

$$g(X, Y, R_i) = 0 \quad (3.9)$$

où Q_i et R_i sont les paramètres des primitives respectivement dans la scène 3D et dans le plan image 2D. De part ces suppositions, nous pouvons établir une interaction entre les primitives R_i et le vecteur vitesse $T_c = (\underline{V}, \underline{\Omega})$ par l'intermédiaire d'un vecteur noté H_i . L'ensemble des éléments H_i est groupé sous la matrice $L_{\underline{s}}$, tout en supposant que $\underline{s}(= R_i)$ représente l'ensemble des primitives 2D. Cette matrice est calculée en supposant les hypothèses suivantes :

$$\begin{cases} g(X, Y, R_i) = 0 \\ \dot{g}(X, Y, R_i) = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Après quelques développements, nous pouvons exprimer :

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial R_i} \dot{R}_i = -\frac{\partial g}{\partial X} \dot{X} - \frac{\partial g}{\partial Y} \dot{Y} \quad (3.11)$$

L'équation (3.11) nous permet de mettre en relation les variations des paramètres $\dot{R}_i$ aux composantes du *flot optique* L_{of} et ainsi au torseur cinématique T_c par l'intermédiaire de l'équation (3.7). Nous allons maintenant utiliser cette méthode pour le cas de la droite pour deux types de paramétrage : (a, b) et (θ, ρ) [Chaumette 90].

3.3.1 Paramétrage (a, b)

Dans un repère tridimensionnel, une droite est définie par l'intersection de deux plans :

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

En utilisant la projection perspective, nous obtenons immédiatement :

$$\frac{1}{Z} = \frac{-(a_ix + b_iy + c_iz)}{d_i}; \quad i = 1, 2 \quad (3.13)$$

L'équation de la droite dans l'espace 2D, résultant de la projection de la droite 3D dans l'espace image (sauf si $d_1 = d_2 = 0$), est exprimée par :

$$AX + BY + C = 0 \quad (3.14)$$

tels que :

$$\begin{aligned} A &= (a_1d_2 - a_2d_1) \\ B &= (b_1d_2 - b_2d_1) \\ C &= (c_1d_2 - c_2d_1) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Cette représentation peut se mettre sous deux formes suivantes :

Représentation 1 : La droite est décrite par l'équation

$$Y = aX + b; (a = -A/B, b = -C/B) \quad (3.16)$$

On a :

$$g(X, Y, R_i) = Y - aX - b = 0 \quad (3.17)$$

En dérivant l'équation (3.17), on peut écrire :

$$\dot{a}X + \dot{b} = \dot{Y} - a\dot{X} \quad (3.18)$$

En utilisant la méthode décrite dans la partie précédente, et en choisissant deux points de la droite $(0, b)$ et $(1, a + b)$, on a alors :

$$\begin{cases} \dot{b} = \dot{Y}_1 - a\dot{X}_1 \\ \dot{a} + \dot{b} = \dot{Y}_2 - a\dot{X}_2 \end{cases} \quad (3.19)$$

$\dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{Y}_1$ et $\dot{Y}_2$ sont données par les équations du flot optique. On obtient :

$$L_{\underline{s}}^T = \begin{pmatrix} \lambda_1 a & -\lambda_1 & \lambda_1 b & 1 + b^2 & a & -ab \\ \lambda_2 a & -\lambda_2 & \lambda_2 b & ab & -b & -1 - a^2 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

avec $\lambda_1 = 1/z_1 = -(b_i b + c_i)/d_i$, $\lambda_2 = 1/z_2 - 1/z_1 = -(a_i + b_i a)/d_i$ et $i = 1, 2$.

Représentation 2 : La seconde représentation est régie par l'équation

$$X = aY + b ; (a = -B/A, b = -C/A) \quad (3.21)$$

On applique exactement la même méthode pour calculer la matrice d'interaction associée. On prend par exemple, les points de coordonnées $(b, 0)$ et $(a + b, 1)$. On obtient alors :

$$L_{\underline{s}}^T = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \lambda_1 a & \lambda_1 b & -a & -1 - b^2 & ab \\ \lambda_2 & \lambda_2 a & \lambda_2 b & b & -ab & 1 + a^2 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

avec $\lambda_1 = 1/z_1 = -(a_i b + c_i)/d_i$, $\lambda_2 = 1/z_2 - 1/z_1 = -(a_i a + b_i)/d_i$ et $i = 1, 2$.

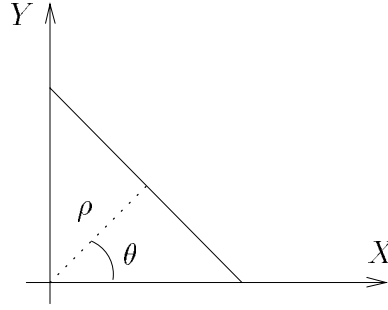
3.3.2 Paramétrage (θ, ρ)

Le paramétrage polaire (θ, ρ) est donné par (voir Figure 3.4) :

$$g(X, Y, R) = \rho - X \cos \theta - Y \sin \theta = 0 \quad (3.23)$$

avec :

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{B}{A} \\ \rho = \frac{-C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \end{cases} \quad (3.24)$$

FIGURE 3.4 – Représentation (θ, ρ) d'une droite 2D.

En utilisant l'équation (3.11), nous calculons la différentielle de l'expression (3.23), pour construire la matrice d'interaction associée à la représentation (θ, ρ) de la droite. Nous trouvons :

$$\dot{\rho} + (X \sin \theta - Y \cos \theta) \dot{\theta} = \dot{X} \cos \theta + \dot{Y} \sin \theta \quad (3.25)$$

En substituant les expressions de X et $1/z$ en fonction de Y , dans l'équation du *flot optique*, nous trouvons par identification terme à terme, l'expression de la matrice d'interaction. Nous avons :

$$\dot{\underline{s}} = L_{\underline{s}}^T T_c \quad (3.26)$$

où $L_{\underline{s}}^T$ est la matrice d'interaction relative à la situation $\underline{s}$, exprimée par :

$$L_{\underline{s}}^T = \begin{pmatrix} \lambda_{\theta} \cos \theta & \lambda_{\theta} \sin \theta & -\lambda_{\theta} \rho & -\rho \cos \theta & -\rho \sin \theta & -1 \\ \lambda_{\rho} \cos \theta & \lambda_{\rho} \sin \theta & -\lambda_{\rho} \rho & (1 + \rho^2) \sin \theta & -(1 + \rho^2) \cos \theta & 0 \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

En utilisant les paramètres de la focale en f_x et f_y dans les équations (3.5), une forme plus générale de la matrice d'interaction est la suivante :

$$L_{\underline{s}}^T = \begin{pmatrix} \lambda_{\theta} \cos \theta & \frac{\lambda_{\theta} f_y \sin \theta}{f_x} & -\frac{\lambda_{\theta} \rho}{f_x} & -\frac{\rho \cos \theta}{f_y} & -\frac{\rho \sin \theta}{f_x} & -\frac{f_x^2 \cos^2 \theta + f_y^2 \sin^2 \theta}{f_x f_y} \\ \lambda_{\rho} \cos \theta & \frac{\lambda_{\rho} f_y \sin \theta}{f_x} & -\frac{\lambda_{\rho} \rho}{f_x} & f_y (1 + \frac{\rho^2}{f_y^2}) \sin \theta & -f_x (1 + \frac{\rho^2}{f_x^2}) \cos \theta & \frac{f_x^2 - f_y^2}{f_x f_y} \rho \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

avec :

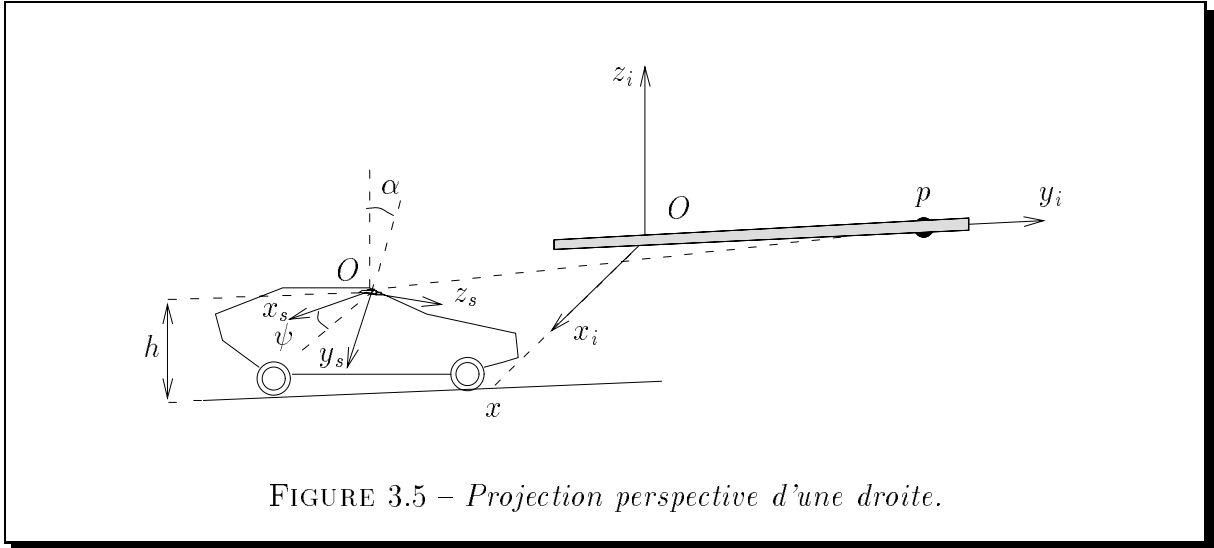
$$\begin{cases} \lambda_{\theta} &= (a_i \sin \theta - b_i \frac{f_x}{f_y} \cos \theta) / d_i \\ \lambda_{\rho} &= (a_i \rho \cos \theta + b_i \frac{f_x}{f_y} \rho \sin \theta + c_i f_x) / d_i \end{cases}$$

La matrice d'interaction développée dans cette partie est plus générale dans le sens où elle exprime tous les mouvements de la caméra. Dans la partie suivante, nous développons

une autre forme d'interaction qui fournit une relation restreinte entre les informations visuelles de la droite et les deux mouvements de la caméra exprimés dans le repère cartésien.

3.4 Projection perspective d'une droite

Notre objectif est d'exprimer l'équation de la droite projetée dans l'image, droite dont les paramètres (indices visuels) sont fonction des coordonnées de la position 3D du véhicule. La scène est représentée par une ligne droite dans l'espace 3D pour laquelle nous cherchons une équation dans le plan image de la caméra. Le passage de l'espace 3D au plan 2D est basé sur la projection perspective. La figure 3.5 mentionne les repères utilisés pour la projection en question, tels que $R_i = (O, x_i, y_i, z_i)$ est le repère de positionnement et $R_s = (O, x_s, y_s, z_s)$ est le repère mobile fixé au niveau de la caméra. On note par h la hauteur de la caméra, α étant son inclinaison (autour de x) et ψ étant l'orientation du véhicule dans le plan (x, y) .



La relation de passage d'un point de la scène à son pixel correspondant dans l'image est donnée par :

$$p_p = Mp_i \quad (3.29)$$

La matrice M représente la matrice homogène de calibrage de la caméra par rapport au repère de la scène.

$$M = P'_c C'_u C_a R_2^{-1} R_1^{-1} T^{-1} \quad (3.30)$$

avec :

- $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T$: coordonnées d'un point p de la scène par rapport au repère de positionnement $R_i(O, x_i, y_i, z_i)$,
- $p_s = (x_s, y_s, z_s)^T$: coordonnées du point dans le repère caméra $R_s = (O, x_s, y_s, z_s)$,
- $p_p = (x_p, y_p, z_p)^T = P'_c C'_u C_a p_s$: coordonnées du point dans le repère de projection (voir équation 3.4),
- $P = (X = \frac{x_p}{z_p}, Y = \frac{y_p}{z_p})^T$: coordonnées du point correspondant dans le plan image.

Nous prenons en compte les caractéristiques intrinsèques de la caméra, représentées par le produit de la matrice de projection P'_c et de la matrice de changement d'unités C'_u , de la matrice de changement de repères C_a , ainsi que les caractéristiques extrinsèques de la caméra représentées par les deux rotations R_1 et R_2 (déviations latérale et inclinaison de la caméra) et des deux translations (position latérale et hauteur de la caméra) regroupées dans T .

Nous avons :

$$P'_c C'_u = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

où :

$f_x = fe_x$, $f_y = fe_y$ sont les constantes intrinsèques de la caméra et α son angle d'inclinaison. Nous notons d'abord que la seconde translation et la troisième rotation sont considérées comme nulles, et que x (position latérale) et ψ (déviations latérale) sont les variables du système.

Le développement des calculs nous donne l'expression de M suivante :

$$M = \begin{bmatrix} f_x \cos \psi & f_x \sin \psi & 0 & f_x x \cos \psi \\ -f_y \sin \alpha \sin \psi & f_y \sin \alpha \cos \psi & -f_y \cos \alpha & -f_y x \sin \alpha \sin \psi + f_y h \cos \alpha \\ -\cos \alpha \sin \psi & \cos \alpha \cos \psi & \sin \alpha & -x \cos \alpha \sin \psi + h \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Les coordonnées du pixel correspondant à chaque point de la droite avec $x_i = z_i = 0$,

sont exprimées par :

$$\begin{cases} X = f_x \frac{y_i \sin \psi + x \cos \psi}{y_i \cos \alpha \cos \psi - x \cos \alpha \sin \psi + h \sin \alpha} \\ Y = f_y \frac{-y_i \sin \alpha \cos \psi - x \sin \alpha \sin \psi + h \cos \alpha}{y_i \cos \alpha \cos \psi - x \cos \alpha \sin \psi + h \sin \alpha} \end{cases} \quad (3.34)$$

Par élimination de y_i , nous obtenons :

$$X = \frac{f_x}{f_y} \left[\frac{f_y(x \sin \alpha + h \sin \psi \cos \alpha) + Y(x \cos \alpha - h \sin \psi \sin \alpha)}{h \cos \psi} \right] \quad (3.35)$$

Comme α et ψ sont petits (< 10 deg), l'approximation de *Taylor* d'ordre deux nous donne :

$$X = \left(\frac{f_x Y}{f_y h} + \frac{f_x \alpha}{h} \right) x + f_x \psi + O(\psi^2) + O(\alpha^2) + O(\alpha \psi) \quad (3.36)$$

3.4.1 Paramétrage (a, b)

L'équation de la droite exprimée dans le repère image est donnée par :

$$X = \frac{f_x x}{f_y h} Y + f_x \left(\frac{\alpha x}{h} + \psi \right) \quad (3.37)$$

en négligeant les termes $O(\psi^2)$, $O(\alpha^2)$ et terme produit $\alpha\psi$.

Par identification, le paramétrage (a, b) est le suivant :

$$\begin{cases} a &= \frac{f_x x}{f_y h} &= \mu_1 x \\ b &= f_x \left(\frac{\alpha x}{h} + \psi \right) &= \mu_2 x + \mu_3 \psi \end{cases} \quad (3.38)$$

Nous exprimons la position latérale x ainsi que la déviation latérale ψ du véhicule pour définir une relation d'interaction entre les variables 3D de positionnement du véhicule et les paramètres 2D de la droite dans l'image. Nous avons :

$$\begin{cases} \dot{x} = \xi_1 \dot{a} \\ \dot{\psi} = \xi_2 \dot{a} + \xi_3 \dot{b} \end{cases} \quad (3.39)$$

avec :

$$\begin{cases} \xi_1 &= \frac{h f_y}{f_x} \\ \xi_2 &= -\frac{\alpha f_y}{f_x} \\ \xi_3 &= \frac{1}{f_x} \end{cases} \quad (3.40)$$

3.4.2 Paramétrage (θ, ρ)

Pour une représentation des droites avec les paramètres (θ, ρ) (voir Figure 3.4), nous exprimons :

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \frac{B}{A} \\ \rho &= \frac{-C}{\sqrt{(A^2+B^2)}}\end{aligned}\quad (3.41)$$

tels que : $A = 1$, $B = -a$ et $C = -b$.

Finalement, nous trouvons la relation d'interaction non-linéaire entre la position du véhicule et les paramètres de la droite tels que :

$$\begin{aligned}x &= k_1 \tan \theta \\ \psi &= k_2 \tan \theta + k_3 \rho \sqrt{1 + \tan^2 \theta}\end{aligned}\quad (3.42)$$

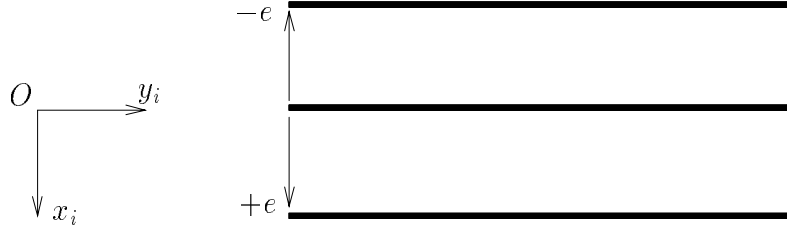
avec :

$$\begin{cases} k_1 &= \frac{f_y h}{f_x} \\ k_2 &= -\frac{f_y \alpha}{f_x} \\ k_3 &= \frac{1}{f_x} \end{cases}\quad (3.43)$$

Les résultats donnés aux § 3.4.1 et 3.4.2 sont obtenus par l'utilisation d'une méthode s'appuyant sur des hypothèses simplificatrices. Ceux obtenus aux § 3.3.1 et 3.3.2 utilisent une méthode plus générale et ne fait appel à aucune hypothèse simplificatrice. En effet, l'application des mêmes simplifications à ces derniers devrait aboutir aux mêmes résultats.

3.5 Modèle de projection à trois droites

Dans le but de créer un environnement de simulation permettant de reproduire la scène visualisée par une caméra, nous avons choisi de modéliser la scène routière par un modèle à trois droites avec un point de fuite. Ainsi, pour chaque position de la caméra référencée par sa position latérale et son orientation latérale, nous figurons une scène composée par trois droites (voir Figure 3.6). Ce modèle doit être intimement lié au type de caméra utilisée. Le repère de positionnement $R_i = (O, x_i, y_i, z_i)$ est placé sur la bande du milieu, les voies ont une largeur de e de part et d'autre de la droite du milieu.

FIGURE 3.6 – *Scène routière représentée par trois droites.*

3.5.1 Modèle à point de fuite

Nous utilisons une méthode qui consiste à écrire une relation linéaire entre la mesure des coordonnées pixel dans l'image et des coordonnées dans un référentiel absolu d'un point dans l'espace.

$$\begin{pmatrix} \lambda X \\ \lambda Y \\ \lambda \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

avec :

$$M = P [RT] = \begin{pmatrix} f_x & 0 & X_0 \\ 0 & f_y & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

sachant que :

- f_x, f_y sont les focales en pixel dans la direction de X et Y du plan image,
- X_0 et Y_0 sont les coordonnées en pixel du centre optique de la caméra,
- $t_{x,y,z}$ sont les translations du repère rétinocentrique par rapport au repère absolu,
- r_{ij} sont les cosinus directeurs respectant les rotations correspondantes.

En notant C_i et S_i comme respectivement le cosinus et le sinus de l'angle i , la matrice M s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} f_x C_\psi - X_0 C_\alpha S_\psi & f_x S_\psi + X_0 C_\alpha C_\psi & X_0 S_\alpha & f_x C_\psi t_x + X_0 (S_\alpha t_z - C_\alpha S_\psi t_x) \\ -S_\psi (f_y S_\alpha + Y_0 C_\alpha) & C_\psi (f_y S_\alpha + Y_0 C_\alpha) & -f_y C_\alpha + Y_0 S_\alpha & -f_y (S_\alpha S_\psi t_x + C_\alpha t_z) - Y_0 (C_\alpha S_\psi t_x - S_\alpha t_z) \\ -C_\alpha S_\psi & C_\alpha C_\psi & S_\alpha & -C_\alpha S_\psi t_x + S_\alpha t_z \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Notons que l'on peut retrouver l'équation de la matrice (3.33) en posant simplement que $X_0 = Y_0 = 0$. Cela revient à considérer que le repère de la caméra est placé au centre optique de celle-ci.

Les coordonnées image d'un point de la scène peuvent s'écrire par :

$$\begin{cases} X = \frac{m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \\ Y = \frac{m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \end{cases} \quad (3.47)$$

Ces deux équations décrivent la droite passant par le centre de projection et le point (X, Y) dans le repère absolu. Pour évaluer les coefficients de la matrice M , il suffit d'écrire ce système d'équations pour les points pour lesquels on mesure la projection dans l'image. Il faut donc prendre un minimum de six points non coplanaires dans l'espace pour déterminer les différents paramètres m_{ij} . Afin d'obtenir une solution non-triviale et du moment que nous avons seulement 11 paramètres, on fixe un des paramètres m_{ij} . On choisit $m_{34} = 1$, ce qui revient à déterminer les paramètres de la caméra à un coefficient près. On peut remarquer aussi que m_{34} n'est autre que la composante en z du vecteur de translation entre le référentiel absolu et le référentiel caméra et qu'on peut facilement s'arranger pour que cette composante ne soit pas nulle [Heraud 93]. A partir des coefficients de calibrage de la caméra, on peut calculer l'image (X, Y) d'un point de l'espace connu dans un référentiel absolu. La réciproque n'est pas possible. Dans notre cas, nous n'avons pas besoin de reconstruire les coordonnées 3D d'un point de la scène mais plutôt de calculer l'image projetée d'un réseau de droites. Ces droites projetées dans l'image se coupent forcément en un point de fuite, à cause de la projection perspective. Nous allons étudier ce phénomène.

Pour une droite placée sur le plan xOy (voir Figure 3.6) on a $z = 0$. Explicitons la forme générale de l'équation de chaque droite dans le plan image.

– **Coordonnée X :**

Commençons par exprimer l'équation en X de (3.47) :

$$X(m_{31}x + m_{32}y + m_{34}) = m_{11}x + m_{12}y + m_{14} \quad (3.48)$$

Pour $y \rightarrow \infty$ et en négligeant les autres termes devant y , l'équation (3.48) donne $X_\infty = \frac{m_{12}}{m_{32}}$. En divisant les deux membres de l'équation par m_{32} , on trouve :

$$yX + \frac{X}{m_{32}}(m_{31}x + m_{34}) - \frac{m_{12}}{m_{32}}y = \frac{1}{m_{32}}(m_{11}x + m_{14})$$

Finalement, on obtient :

$$y(X - X_\infty) = \frac{1}{m_{32}}[(m_{11}x + m_{14}) - X(m_{31}x + m_{34})] \quad (3.49)$$

– **Coordonnée Y :**

De même pour Y , on exprime :

$$Y(m_{31}x + m_{32}y + m_{34}) = m_{21}x + m_{22}y + m_{24} \quad (3.50)$$

Pour $y \rightarrow \infty$ et en négligeant les autres termes devant y , l'équation (3.50) donne $Y_\infty = \frac{m_{22}}{m_{32}}$. En divisant les deux membres de l'équation par m_{32} , on trouve :

$$yY + \frac{Y}{m_{32}}(m_{31}x + m_{34}) - \frac{m_{22}}{m_{32}}y = \frac{1}{m_{32}}(m_{21}x + m_{24})$$

De même que précédemment :

$$y(Y - Y_\infty) = \frac{1}{m_{32}}[(m_{21}x + m_{24}) - Y(m_{31}x + m_{34})] \quad (3.51)$$

– **Equation 2D de la droite :**

Finalement le rapport entre l'équation (3.49) et (3.51) nous donne :

$$\frac{X - X_\infty}{Y - Y_\infty} = \frac{(m_{11}x + m_{14}) - X(m_{31}x + m_{34})}{(m_{21}x + m_{24}) - Y(m_{31}x + m_{34})} \quad (3.52)$$

On peut facilement montrer que (3.52) est équivalente à la forme suivante :

$$X - X_\infty = (Y - Y_\infty) \frac{(m_{11}x + m_{14}) - X_\infty(m_{31}x + m_{34})}{(m_{21}x + m_{24}) - Y_\infty(m_{31}x + m_{34})} \quad (3.53)$$

Cette formulation est valable pour toute droite référencée par la variable x et distante de e par rapport à la bande centrale, avec :

$$x = i \, e \quad \begin{cases} i = -1 & \text{pour la bande de gauche} \\ i = 0 & \text{pour la bande du milieu} \\ i = +1 & \text{pour la bande de droite} \end{cases} \quad (3.54)$$

3.5.2 Validation du modèle en simulation

Etudions le comportement du point de fuite selon le type du mouvement effectué par la caméra. Ce point est exprimé dans le cadre de notre application par les éléments de l'équation (3.46). Il suffit d'exploiter les équations données par (3.47) en faisant tendre y vers l'infini. On trouve :

$$\begin{cases} X_\infty = X_0 + \frac{f_x}{\cos \alpha} \tan \psi \\ Y_\infty = Y_0 + f_y \tan \alpha \end{cases} \quad (3.55)$$

Mouvement sans rotation : En l'absence de toute rotation de la caméra, on remarque bien que quel que soit le repère de la caméra, pour un mouvement de translation t_x et t_z seuls, le point de fuite ne varie pas (voir les deux figures 3.7 et 3.8). Il a pour coordonnées dans l'image $X_\infty = X_0$ et $Y_\infty = Y_0$. Dans ce cas, l'équation de la droite correspondant à la bande centrale ($x = 0$) s'exprime par :

$$X - X_0 = (Y - Y_0) \frac{f_x}{f_y} \frac{x + t_x}{t_z} \quad (3.56)$$

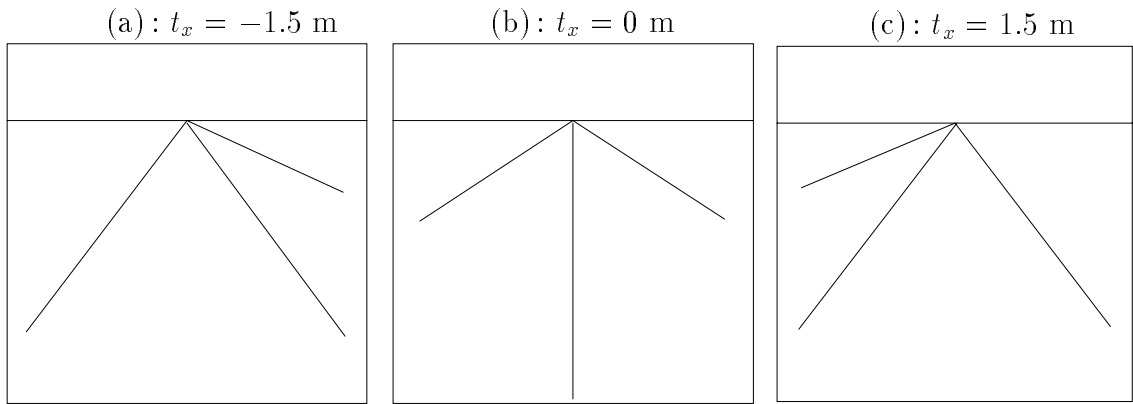


FIGURE 3.7 – Validation du modèle de la route - translation selon l'axe x .

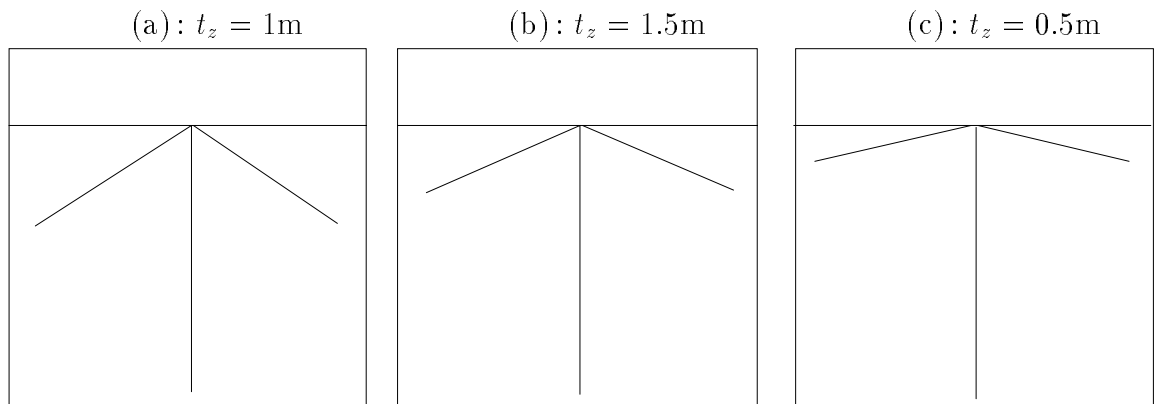
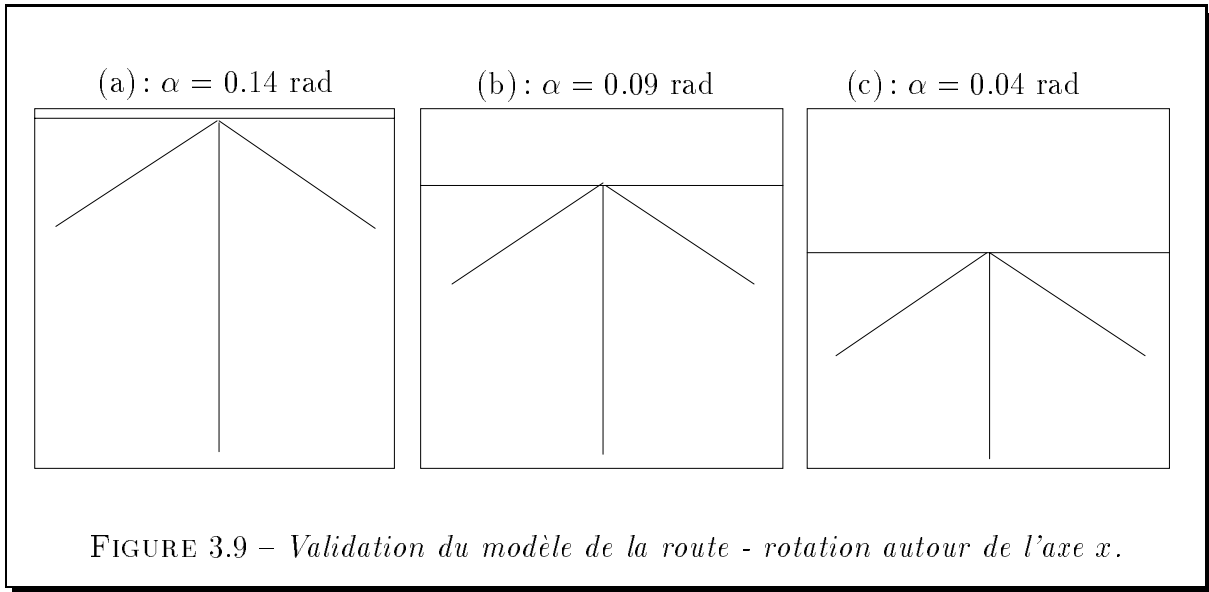


FIGURE 3.8 – Validation du modèle de la route - translation selon l'axe z .

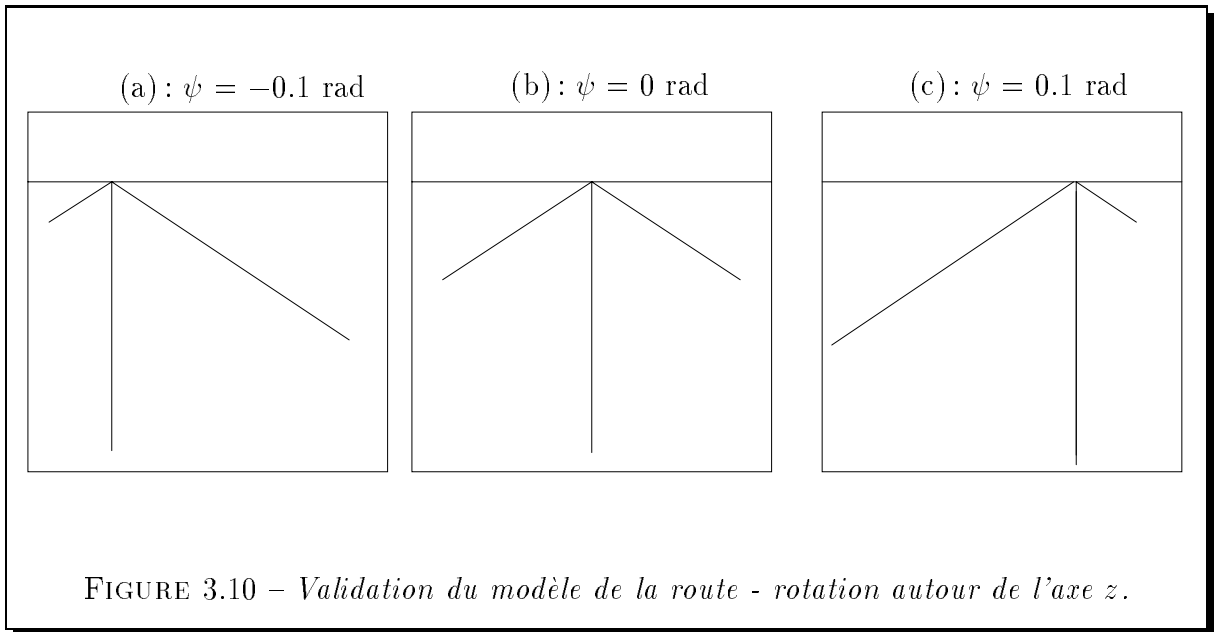
Mouvement de rotation autour de l'axe x : Nous considérons que la caméra effectue juste un mouvement de rotation selon l'axe x . Dans ce cas le point de fuite possède comme coordonnées : $X_\infty = X_0$ et $Y_\infty = Y_0 + f_y \tan \alpha$. L'ordonnée du point de fuite varie en fonction de la valeur α et se déplace selon l'axe Y dans le plan image, l'abscisse étant constante (voir la figure 3.9). L'équation de la droite est exprimée par :

$$X - X_0 = (Y - Y_0 - f_y \tan \alpha) \frac{f_x}{f_y} \frac{x}{\tan \alpha \sin \alpha} \quad (3.57)$$



Mouvement de rotation autour de l'axe z : Dans les mêmes conditions que dans le cas précédent, on fait subir à la caméra une rotation ψ autour de l'axe z . Dans ce cas, le point de fuite possède comme coordonnées : $X_\infty = X_0 + f_x \tan \psi$ et $Y_\infty = Y_0$. L'abscisse du point de fuite varie en fonction de la valeur ψ et se déplace selon l'axe X dans le plan image, l'ordonnée étant constante (voir la figure 3.10). L'équation de la droite en question est donnée par :

$$X - X_0 - f_x \tan \psi = -(Y - Y_0) \frac{f_x}{f_y} \frac{x}{\cos \psi t_z} \quad (3.58)$$



3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la problématique de la modélisation de vision monoculaire dans le cas d'une application de guidage dans un environnement routier. Dans le contexte de notre application, nous avons brièvement justifié l'utilisation d'une approche 2D par rapport à une approche 3D basée sur la reconstruction.

Notre approche consiste à utiliser des modèles 2D projetés dans l'image de la scène, en vue de la commande. Deux formes de modélisation d'une primitive de type droite ont été traitées. La première est basée sur l'expression d'une matrice d'interaction dans l'espace lié au capteur. La seconde génère une matrice d'interaction dans l'espace cartésien. L'avantage de la première forme de modélisation est qu'elle est très générale et peut être utilisée pour n'importe quel système commandé dans le repère capteur. Par contre, la seconde méthode est adaptée au cas spécifique où le nombre de degrés de déplacement de la caméra, lié à l'application, est limité. Dans notre cas, deux degrés de déplacement sont utilisés et les actions sont relatives à un repère de positionnement.

Notons que la représentation (a, b) est minimale, mais nécessite l'emploi de deux cartes. Le passage d'une carte à l'autre peut entraîner des difficultés en commande d'une manière générale. Il est donc préférable d'utiliser une représentation des droites complète au sens où un seul paramétrage est nécessaire pour représenter l'ensemble des droites. Dans le cadre de notre application, le paramétrage (a, b) peut s'avérer suffisant du fait que le mouvement du véhicule s'effectue sur un plan. Par conséquent il engendre l'utilisation d'une seule carte et ne pose pas de problème en commande.

Un modèle 2D d'une scène routière, constitué par trois droites parallèles se coupant dans l'image en un point de fuite, a été synthétisé et testé dans différentes situations en intégrant le modèle de la caméra. L'objectif est de simuler la partie vision, partie intégrante de la commande référencée vision considérée dans le cadre de notre étude.

Chapitre 4

Mise en œuvre de la commande référencée vision

*And see! she stirs, she starts,
she moves, she seems to feel
the thrill of life!*

Henry Wadsworth Longfellow

Dans les deux chapitres précédents, nous avons élaboré la modélisation de deux composantes mises en jeu dans une chaîne d’asservissement visuel d’un véhicule mobile, à savoir le modèle du véhicule et celui de la scène. Dans cette partie, nous nous penchons sur l’aspect contrôle latéral du véhicule par la commande référencée vision. La première partie décrit l’implantation de différents algorithmes de commande dans l’espace d’état. Une approche robuste dans l’espace fréquentiel fait l’objet de la seconde partie.

4.1 Introduction

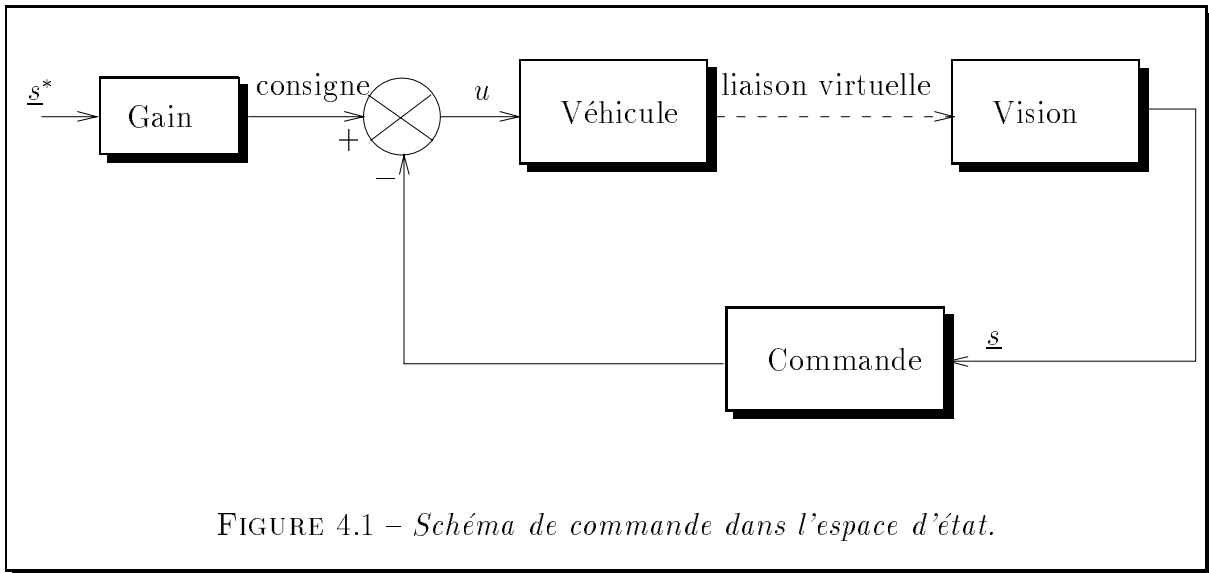
D’une part, nous présentons l’aspect commande référencée vision appliqué à un robot mobile pour le suivi de trajectoire (contrôle latéral) dont le formalisme est donné dans l’espace d’état. La technique de commande par placement de pôles, retenue pour la synthèse de nos lois de commande, sera exposée dans le but de formaliser la fonction de tâche référencée vision. Ce formalisme sera validé dans notre cas pour des applications d’asservissements visuels mettant en évidence les aspects cinématique et dynamique du véhicule étudiés au chapitre 3 ainsi que les modèles d’interaction présentés dans le chapitre 4.

D’autre part, nous mettons en œuvre une loi de commande robuste dont le formalisme est donné dans l’espace fréquentiel fondée sur une technique H^∞ . Elle tient compte des

variations des différents paramètres des fonctions de transfert régissant notre système. Ces paramètres sont dus aux phénomènes de roulis et de tangage par exemple. Les techniques H^∞ permettent de fixer un seul contrôleur pour une multitude de fonctions de transfert bornées dans l'espace fréquentiel.

4.2 Synthèse de la commande dans l'espace d'état

Nous présentons deux types de commandes, cinématique ou dynamique, selon le modèle du véhicule utilisé. Les modèles d'état élaborés sont exprimés dans l'espace image dans le sens où le vecteur d'état est composé des variables 2D liées au repère de l'image. Pour cela, nous intégrons non seulement le modèle d'interaction 2D/3D, mais aussi le modèle du véhicule. En premier lieu, nous étudions une commande cinématique, généralisable à tout robot mobile à deux roues directrices. En second lieu, nous nous occupons de la commande dynamique appliquée particulièrement à un véhicule automobile. Les commandes que nous développons sont synthétisées par une technique de placement de pôles décrite dans la partie §A.1.2.1 de l'annexe. Le schéma de commande considéré est celui de la figure 4.1.



La commande cinématique est basée sur l'utilisation du modèle cinématique du véhicule. Dans ce cas, nous distinguons l'approche employant le modèle d'interaction élaboré dans l'espace cartésien du robot mobile, de l'approche basée sur le torseur d'interaction exprimé dans le repère de la caméra. La commande dynamique tient compte des caractéristiques dynamiques du véhicule ainsi que des composantes du modèle d'interaction exprimé dans le repère cartésien et utilisant le paramétrage (a, b) de la droite.

La démarche que nous adoptons consiste à augmenter la complexité des modèles dans la synthèse des lois de commande afin de mettre en évidence leurs limitations et de faire apparaître le meilleur compromis complexité/performances.

4.2.1 Commande cinématique : paramétrage (a, b)

Cette approche utilise le modèle cinématique simplifié élaboré dans §2.3 (équation 2.8) ainsi que le modèle d'interaction donné dans §3.4.1 (équation 3.39). Le vecteur d'état représente les paramètres (a, b) d'une droite dans le plan image.

4.2.1.1 Modèle avec commande en position δ

Dans ce cas, l'entrée de commande est représentée par l'action sur l'angle des roues δ . Afin de dégager un modèle de commande dans l'espace image, nous intégrons les équations cinématiques du véhicule dans le modèle d'interaction. Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} -V\psi &= \xi_1 \dot{a} \\ (V/L)\delta &= \xi_2 \dot{a} + \xi_3 \dot{b} \end{cases} \quad (4.1)$$

Le vecteur d'état choisi est composé des informations visuelles liées à la scène observée. Dans ce cas, ce vecteur noté $\underline{s} = (a, b)^T$ est identique au vecteur de mesure dans la représentation d'état. Après quelques traitements mathématiques, nous aboutissons à la caractérisation du modèle dans l'espace d'état suivant :

$$\dot{\underline{s}} = \begin{bmatrix} -\frac{V\xi_2}{\xi_1} & -\frac{V\xi_3}{\xi_1} \\ \frac{V\xi_2^2}{\xi_1\xi_3} & \frac{V\xi_2}{\xi_1} \end{bmatrix} \underline{s} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V}{L\xi_3} \end{bmatrix} \delta \quad (4.2)$$

avec :

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{hf_y}{f_x} \\ \xi_2 = -\frac{\alpha f_y}{f_x} \\ \xi_3 = \frac{1}{f_x} \end{cases}$$

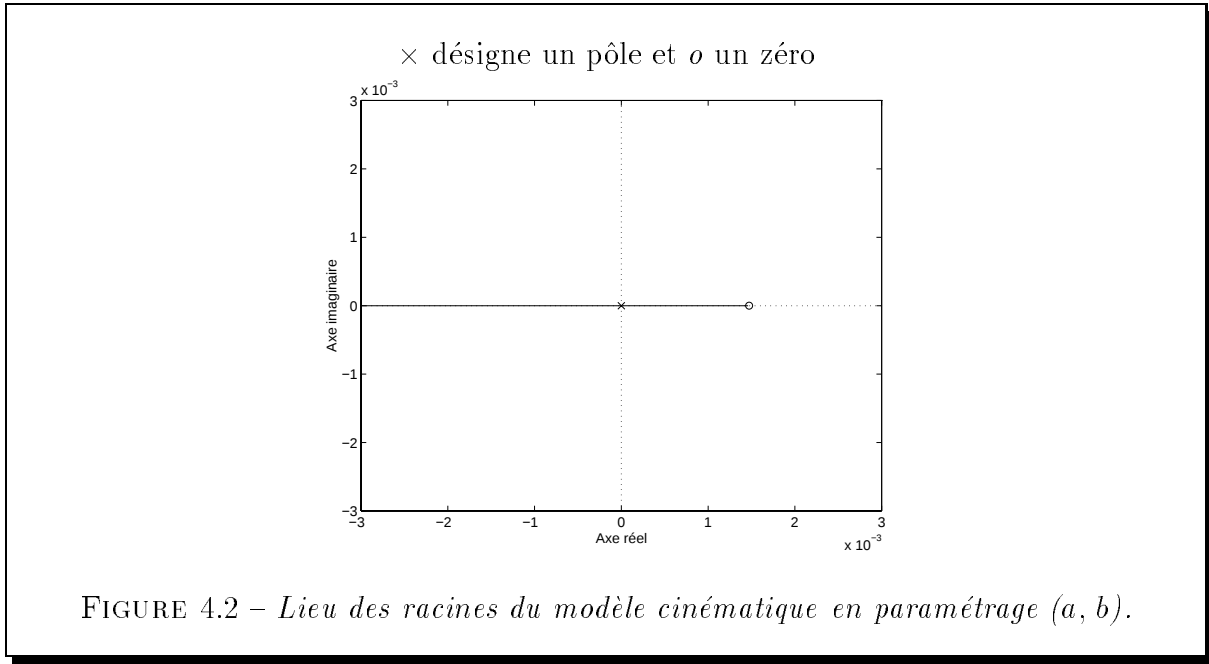
La figure 4.2 montre le lieu des racines du modèle d'état en question en considérant la sortie $y = b$. Nous remarquons l'existence de deux pôles à l'origine qui nécessitent d'être déplacés dans la partie gauche du plan complexe.

Pour cela, le vecteur gain, exprimé par (A.33), est dégagé en assimilant le comportement du système à celui d'un système du second ordre dont l'équation caractéristique est donnée par : $\lambda^2 + 2\xi\omega_0\lambda + \omega_0^2$. La loi de commande est directement exprimée en fonction de la matrice de commandabilité Q et d'une matrice W définies dans la partie §A.1.2.1. On trouve les matrices suivantes :

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{V^2}{\xi_1 L} \\ \frac{V}{L\xi_3} & \frac{V^2\xi_2}{\xi_1 L\xi_3} \end{bmatrix}; \quad W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

On trouve les deux gains de commande suivants :

$$G : \begin{cases} g_1 = \frac{L\omega_0 (2\xi_2 \xi V - \xi_1 \omega_0)}{V^2} \\ g_2 = \frac{2L\xi_3 \xi \omega_0}{V} \end{cases} \quad (4.4)$$



On remarque que la condition de commandabilité du système est donnée par l'expression du déterminant de Q de l'équation (4.5) qui s'annule lorsque la vitesse linéaire V du véhicule est nulle. Cela indique que le système est non commandable lorsque le véhicule est à l'arrêt.

$$\det(Q) = \frac{V^3}{\xi_1 L^2 \xi_3} \neq 0 \Rightarrow V \neq 0 \quad (4.5)$$

4.2.1.2 Modèle avec commande en vitesse $\dot{\delta}$

On prend le même modèle que le précédent avec une commande en vitesse de l'angle des roues $u = \dot{\delta}$. Le vecteur d'état est composé non seulement des indices visuelles de la droite, mais aussi de l'angle de braquage des roues. Cela suppose l'installation d'un capteur au niveau des roues du véhicule afin de mesurer l'angle des roues δ . Le modèle

s'exprime de la façon suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V\xi_2}{\xi_1} & -\frac{V\xi_3}{\xi_1} & 0 \\ \frac{V\xi_2^2}{\xi_1\xi_3} & \frac{V\xi_2}{\xi_1} & \frac{V}{L\xi_3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ \delta \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (4.6)$$

La même procédure de commande que précédemment est utilisée. Le système est assimilé à un 3^e ordre dont l'équation caractéristique est donnée par : $\lambda^3 + (2\xi\omega_0 + \omega_1)\lambda^2 + (2\xi\omega_0\omega_1 + \omega_0^2)\lambda + \omega_0^2\omega_1$. Les matrices Q et W s'expriment par :

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V^2}{\xi_1 L} \\ 0 & \frac{V}{L\xi_3} & \frac{V^2\xi_2}{\xi_1 L\xi_3} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Finalement le vecteur G est donné par :

$$G : \begin{cases} g_1 = \frac{L\omega_0(2\xi_2 V\xi\omega_1 + \xi_2 V\omega_0 - \xi_1 \omega_0 \omega_1)}{V^2} \\ g_2 = \frac{L\xi_3 \omega_0 (2\xi\omega_1 + \omega_0)}{V} \\ g_3 = 2\xi\omega_0 + \omega_1 \end{cases} \quad (4.8)$$

Nous constatons la même condition de commandabilité puisque le déterminant de la matrice Q est identique au précédent.

Dans les deux cas traités, nous avons remarqué que la condition de commandabilité est directement liée à la vitesse de déplacement du véhicule qui doit être toujours strictement positive afin d'éviter que les gains tendent vers l'infini à l'arrêt. Pour le suivi de trajectoire qui nous intéresse, on doit toujours être à une vitesse longitudinale non nulle. En revanche, cela pourrait être gênant en pratique pour des applications où l'on souhaiterait adapter les gains de commande en fonction de la vitesse V . Une solution pour palier ce problème consiste à faire un placement de pôles proportionnels à V^2 . On en déduit les gains suivants :

$$\begin{cases} g_1 = 2V\xi_2 L\xi\omega_0 - L\xi_1 \omega_0^2 \\ g_2 = 2VL\xi_3 \xi\omega_0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Cette solution permet de contourner un problème d'existence de retour d'état pour le suivi de trajectoire à vitesse nulle. Cela évite simplement que les gains augmentent infiniment à $V = 0$.

4.2.2 Commande cinématique : paramétrage (θ, ρ)

Nous rappelons d'une manière générale la relation d'interaction concernant une droite paramétrée en $(\theta, \rho)^T$ donnée par l'équation (3.27) du chapitre 4 :

$$\dot{\underline{s}} = L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^T T_c \quad (4.10)$$

où $\underline{s}(= (\theta, \rho)^T)$ est le vecteur d'information visuelle et $T_c = (V_x, V_y, V_z, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)^T$ est le torseur cinématique représentant les différentes vitesses de la caméra.

Nous considérons que la matrice d'interaction $L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^T$ correspondant à la situation d'équilibre $\underline{s}^* = (\theta^*, \rho^*)^T$ est mise sous la forme :

$$L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^T = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} & l_{15} & l_{16} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & l_{24} & l_{25} & l_{26} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Dans le cas où la situation désirée est représentée par une droite centrée dans l'image ($\theta^* = \rho^* = 0$), la matrice d'interaction (4.11) a pour expression (voir l'équation (3.27) du §3.3.2) :

$$L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^T = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ l_{21} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Ainsi, à partir de (4.10) on peut exprimer le torseur cinématique T_c en fonction de la pseudo-inverse, notée $L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^{T+}$, de la matrice d'interaction globale par :

$$T_c = L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^{T+} \dot{\underline{s}} \quad (4.13)$$

A partir de la détermination du noyau de la matrice d'interaction (matrice de rang deux), on peut choisir de contraindre la translation latérale du véhicule ainsi que son orientation en introduisant une matrice de rang deux telle que :

$$T_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^{T+} \dot{\underline{s}} \quad (4.14)$$

Par conséquent la matrice $L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^T$ est limitée aux colonnes correspondantes. Voyons maintenant comment, à partir de ces considérations, élaborer un modèle d'état du système. Le vecteur de mesure est représentée par les paramètres de la droite et la seule action disponible est celle de l'angle des roues d'un véhicule.

4.2.2.1 Elaboration du modèle d'état

On ne considère que les deux degrés de déplacement latéral du véhicule. En effet, la matrice d'interaction, pour une droite centrée dans l'image, se réduit aux deux colonnes correspondant aux deux mouvements en question telle que :

$$\dot{\underline{s}} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{15} \\ l_{21} & l_{25} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ \Omega_y \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

avec :

$$\begin{cases} l_{11} &= \lambda_\theta^* \cos \theta^* \\ l_{15} &= \rho^* \sin \theta^* \\ l_{21} &= \lambda_\rho^* \cos \theta^* \\ l_{25} &= (1 + \rho^{*2}) \cos \theta^* \\ \lambda_\theta^* &= (\cos \alpha \cos \theta^*)/h \\ \lambda_\rho^* &= -(\cos \alpha \rho^* \sin \theta^* + \sin \alpha)/h \end{cases}$$

L'équation du plan de la route s'exprime dans ces conditions par :

$$y \cos \alpha + z \sin \alpha + h = 0 \quad (4.16)$$

Si l'on néglige l'influence de la composante normale de la vitesse par rapport à la composante longitudinale, on considère que les vitesses V_x et Ω_y sont exprimées par les équations cinématiques du véhicule suivantes :

$$\begin{cases} V_x &= -V\psi \\ \Omega_y &= \frac{V}{L}\delta \end{cases} \quad (4.17)$$

et que :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{15} \\ l_{21} & l_{25} \end{bmatrix}^{-1} \underline{\dot{s}} \quad (4.18)$$

Par intégration de (4.18) et en considérant que les termes l_{ij} sont constants, on trouve :

$$\begin{pmatrix} x \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{15} \\ l_{21} & l_{25} \end{bmatrix}^{-1} \underline{s} + \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

tels que k_1 et k_2 sont des constantes d'intégration qui s'annulent si les conditions initiales sont nulles. Par utilisation de (4.17) et de (4.19), nous exprimons facilement V_x et Ω_y tel que :

$$\begin{cases} V_x &= -\frac{V}{\Delta l}(-l_{21}\theta + l_{11}\rho) + k_2 \\ \Omega_y &= \frac{V}{L}\delta \end{cases} \quad (4.20)$$

avec : $\Delta l = l_{11}l_{25} - l_{21}l_{15}$

Nous remarquons que Δl est toujours non nulle pour la situation qui correspond à une droite centrée dans l'image, avec $\theta^* = \rho^* = 0$ à condition que l'angle d'inclinaison de la caméra soit différent de $\frac{\pi}{2} \pm k\pi$. Après quelques développements, on aboutit à une représentation d'état du système (4.15) :

$$\underline{\dot{s}} = A \underline{s} + B u + K I \quad (4.21)$$

avec :

$$\begin{cases} A = \frac{V}{\Delta l} \begin{bmatrix} -l_{11}l_{21} & l_{11}^2 \\ -l_{21}^2 & l_{11}l_{21} \end{bmatrix}; & B = \frac{V}{L} \begin{bmatrix} l_{15} \\ l_{25} \end{bmatrix} \\ \underline{s} = \begin{pmatrix} \theta \\ \rho \end{pmatrix}; & u = \delta; K = k_2 V \begin{pmatrix} l_{11} \\ l_{21} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (4.22)$$

4.2.2.2 Modèle avec commande en position δ

Nous introduisons dans la boucle de commande les informations visuelles θ et ρ d'une droite. La représentation d'état du système pour une droite centrée dans l'image est

donnée par :

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\rho} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V l_{11} l_{21}}{l_{11} l_{25} - l_{21} l_{15}} & -\frac{V l_{11}^2}{l_{11} l_{25} - l_{21} l_{15}} \\ \frac{V l_{21}^2}{l_{11} l_{25} - l_{21} l_{15}} & -\frac{V l_{11} l_{21}}{l_{11} l_{25} - l_{21} l_{15}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \rho \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V l_{15}}{L} \\ \frac{V l_{25}}{L} \end{bmatrix} \delta \quad (4.23)$$

Sur la figures 4.3, nous avons représenté le lieu des racines de notre système en considérant les deux sorties θ et ρ . Nous remarquons l'existence de deux pôles à l'origine qui nécessitent une correction adéquate dans l'objectif de les déplacer dans la partie gauche du plan complexe.

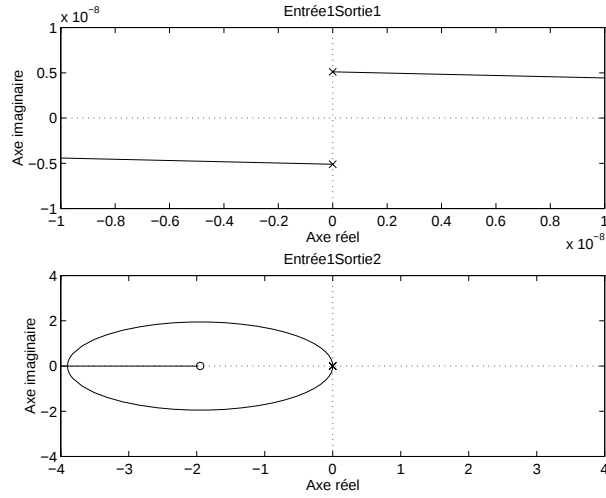


FIGURE 4.3 – Lieu des racines du modèle cinématique en paramétrage (θ, ρ) .

La loi de commande est synthétisée en utilisant une technique de placement de pôles par une retour d'état $\delta = -G\underline{s}$ en assimilant le comportement du système à un système du second ordre. Les matrices Q et W d'un tel système sont exprimées par :

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{V l_{15}}{L} & -\frac{V^2 l_{11}}{L} \\ \frac{V l_{25}}{L} & -\frac{V^2 l_{21}}{L} \end{bmatrix}; \quad W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

G est exprimée comme suit :

$$G : \begin{cases} g_1 = -\frac{L \omega_0 (2 l_{21} \xi V + l_{25} \omega_0)}{V^2 (l_{11} l_{25} - l_{21} l_{15})} \\ g_2 = \frac{L \omega_0 (2 l_{11} \xi V + l_{15} \omega_0)}{V^2 (l_{11} l_{25} - l_{21} l_{15})} \end{cases} \quad (4.25)$$

Les conditions de commandabilité d'un tel système sont données en examinant le déterminant de la matrice Q . Ces conditions sont exprimées par :

$$\det(Q) = \frac{V^3 (l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21})}{L^2} \neq 0 \Rightarrow \begin{cases} V \neq 0 \\ l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21} \neq 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

La première condition exige que le véhicule soit toujours en mouvement longitudinal. On perd la commandabilité du système dès que la trajectoire est statique. Cela s'explique aussi par le fait que les gains de la commande inversement proportionnels à la vitesse V , deviennent infinis si $V = 0$. La seconde condition de non commandabilité est vérifiée seulement lorsque la caméra est perpendiculaire au sol conditionnée par $\cos \alpha = 0$.

4.2.2.3 Modèle avec commande en vitesse $\dot{\delta}$

Si la commande est effectuée en vitesse de l'angle des roues $u = \dot{\delta}$, on introduit une troisième variable d'état notée δ telle que $\underline{s} = (\theta, \rho, \delta)^T$. Dans ce cas, les équations d'état deviennent :

$$\dot{\underline{s}} = \begin{bmatrix} \frac{l_{11} V l_{21}}{l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21}} & -\frac{l_{11}^2 V}{l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21}} & \frac{l_{15} V}{L} \\ \frac{l_{21}^2 V}{l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21}} & -\frac{l_{11} V l_{21}}{l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21}} & \frac{l_{25} V}{L} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{s} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (4.27)$$

Les matrices Q et W sont données par :

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & \frac{l_{15} V}{L} & -\frac{l_{11} V^2}{L} \\ 0 & \frac{l_{25} V}{L} & -\frac{l_{21} V^2}{L} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Les mêmes conditions de commandabilité sont observées pour ce type de commande que celles d'une commande en δ . Finalement, la matrice des gains G est déduite de la même manière que précédemment en assimilant le comportement du système à celui du 3^e ordre. On trouve :

$$G : \begin{cases} g_1 = -\frac{L \omega_0 (2 l_{21} V \xi \omega_1 + l_{21} V \omega_0 + l_{25} \omega_0 \omega_1)}{V^2 (l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21})} \\ g_2 = \frac{L \omega_0 (2 l_{11} V \xi \omega_1 + l_{11} V \omega_0 + l_{15} \omega_0 \omega_1)}{V^2 (l_{11} l_{25} - l_{15} l_{21})} \\ g_3 = 2 \xi \omega_0 + \omega_1 \end{cases} \quad (4.29)$$

Nous avons montré dans cette partie la représentation d'état d'un système pour une commande cinématique, en procédant à la réduction de l'expression générale de la matrice d'interaction dans le cas du paramétrage (θ, ρ) d'une droite.

4.2.3 Commande dynamique

Le modèle dynamique est généralement utilisé pour l'étude en simulation des algorithmes de commande. Une autre application du modèle dynamique est son utilisation dans des algorithmes de commandes avancés. Ces commandes sont nécessaires lorsque des allures rapides et une grande précision dynamique sont exigées. C'est cette application que nous allons étudier dans cette partie, à travers les différents modèles de commande que nous élaborons.

4.2.3.1 Modèle dynamique complet

Dans cette partie, nous élaborons un modèle d'état intégrant le modèle d'interaction décrit au §3.4.1 ainsi que le modèle dynamique élaboré par les équations (2.41). Nous considérons une commande $u = \delta$ ainsi que le modèle de la dynamique latérale du véhicule exprimé par :

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & A_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ x \\ \dot{\psi} \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} A_3 \\ 0 \\ A_5 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (4.30)$$

avec :

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\mu}{Mv}(C_f + C_r) \\ A_2 = -\frac{\mu}{M}(C_f + C_r) \\ A_3 = -\frac{\mu}{M}C_f \\ A_4 = \frac{\mu}{I_z v}(C_f L_f^2 + C_r L_r^2) \\ A_5 = -\frac{\mu}{I_z}C_f L_f \end{cases}$$

Afin d'avoir le modèle d'état exprimé dans l'espace image, on substitue le vecteur d'état $(\dot{x}, x, \dot{\psi}, \psi)^T$ par le vecteur de mesure dans l'image $(\dot{a}, a, \dot{b}, b)^T$. On utilise pour cela le modèle d'interaction 2D/3D élaboré en §3.4.1. On peut donc déduire l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ x \\ \dot{\psi} \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \xi_1 & 0 & 0 \\ \xi_2 & 0 & \xi_3 & 0 \\ 0 & \xi_2 & 0 & \xi_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{a} \\ a \\ \dot{b} \\ b \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

Finalement, par substitution de (4.31) dans (4.30), on aboutit aux équations d'état suivantes :

$$\begin{pmatrix} \ddot{a} \\ \dot{a} \\ \ddot{b} \\ \dot{b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & \frac{A_2 \xi_2}{\xi_1} & 0 & \frac{A_2 \xi_3}{\xi_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\xi_2 (A_1 - A_4)}{\xi_3} & -\frac{\xi_2^2 A_2}{\xi_1 \xi_3} & A_4 & -\frac{A_2 \xi_2}{\xi_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{a} \\ a \\ \dot{b} \\ b \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{A_3}{\xi_1} \\ 0 \\ -\frac{\xi_2 A_3 - A_5 \xi_1}{\xi_1 \xi_3} \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (4.32)$$

L'équation caractéristique d'un tel système est donnée par :

$$\lambda^2 [\lambda^2 - \lambda(A_1 + A_4) + A_1 A_4] \quad (4.33)$$

Ainsi l'équation W nécessaire pour le calcul de la matrice de commande s'exprime par :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & -A_1 - A_4 & A_1 A_4 & 0 \\ 0 & 1 & -A_1 - A_4 & A_1 A_4 \\ 0 & 0 & 1 & -A_1 - A_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

La matrice de commandabilité Q s'écrit par :

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_3 & Q_5 & Q_7 \\ 0 & Q_1 & Q_3 & Q_5 \\ Q_2 & Q_4 & Q_6 & Q_8 \\ 0 & Q_2 & Q_4 & Q_6 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

avec

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{A_3}{\xi_1} & Q_5 &= \frac{A_1^2 A_3 + A_2 A_5}{\xi_1} \\ Q_2 &= -\frac{\xi_2 A_3 - A_5 \xi_1}{\xi_3 \xi_1} & Q_6 &= -\frac{\xi_2 A_1^2 A_3 - A_4^2 \xi_1 A_5 + A_2 \xi_2 A_5}{\xi_3 \xi_1} \\ Q_3 &= \frac{A_1 A_3}{\xi_1} & Q_7 &= \frac{A_1^3 A_3 + A_1 A_2 A_5 + A_2 A_4 A_5}{\xi_1} \\ Q_4 &= -\frac{\xi_2 A_3 A_1 - A_4 A_5 \xi_1}{\xi_3 \xi_1} & Q_8 &= -\frac{\xi_2 A_1^3 A_3 + \xi_2 A_1 A_2 A_5 + \xi_2 A_2 A_4 A_5 - A_4^3 \xi_1 A_5}{\xi_3 \xi_1} \end{aligned}$$

La condition de commandabilité est déterminée en exprimant le déterminant de la matrice Q tel que :

$$\det(Q) = \frac{A_5^3 A_2 (A_1^2 A_3 - A_1 A_3 A_4 + A_2 A_5)}{\xi_1^2 \xi_3^2} \quad (4.36)$$

En effet, le système décrit par les équations (4.32) est commandable si et seulement si la matrice Q est de rang plein, autrement dit si le déterminant donné par (4.36) est non nul. On peut remarquer que d'après (4.36), le système est non commandable si au moins l'une des conditions suivantes est vérifiée :

$$\begin{cases} A_5^3 A_2 = 0 \\ A_1^2 A_3 - A_1 A_3 A_4 + A_2 A_5 = 0 \\ 1/\xi_1^2 \xi_3^2 = 0 \end{cases} \quad (4.37)$$

Pour exprimer la matrice de commande on assimile dans ce cas le comportement du système à un 4^e ordre dont l'équation caractéristique est donnée par : $(\lambda^2 + 2\xi\omega_0\lambda + \omega_0^2)(\lambda^2 + \omega_1^2)$.

On montre sur la figure 4.4 le lieu des racines du modèle complet. La correction d'un tel système permettra de ramener les pôles à l'origine dans le demi-plan gauche du plan complexe. Nous remarquons d'un autre côté que le système possède quatre pôles et

nécessitent donc un placement de deux paires de pôles. Si l'une des paires est proche de l'origine et tend à ralentir l'évolution du système et que la seconde paire de pôles fixe l'amplitude maximale de la commande, le comportement ainsi décrit risque de ne pas être efficace. Cette conséquence nous conduit à envisager de réduire l'ordre du système en effectuant un changement de variables convenable et de faire un placement des pôles efficace. C'est l'objet de la section suivante où nous simplifions le modèle d'état.

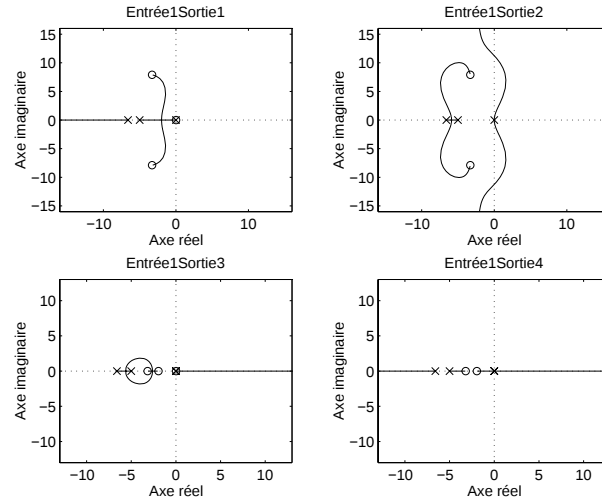


FIGURE 4.4 – *Lieu des racines du modèle dynamique complet.*

4.2.3.2 Modèle simplifié avec commande en δ

L'objectif de la simplification envisagée est de réduire l'ordre du système afin de mieux le commander. Le nouveau vecteur d'état recherché est reconstruit à partir des mesures des paramètres (a, b) de la droite. On introduit sur le modèle dynamique (4.32) un nouveau paramétrage en choisissant judicieusement de nouvelles variables z_1 et z_2 de sorte que l'on puisse facilement retrouver, à partir du modèle dynamique, le modèle cinématique et par conséquent le vecteur d'état, noté $(a, b)^T$. De ce fait, l'une des solutions possibles serait de considérer le changement de variables à travers le nouveau vecteur d'état suivant :

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 1 & 0 & \beta \\ 0 & \mu & \gamma & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{a} \\ a \\ \dot{b} \\ b \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

tels que :

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{\xi_1 A_4}{\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2} \\ \beta = \frac{A_2 \xi_3}{\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2} \\ \gamma = \frac{\xi_1 A_4}{A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2} \\ \mu = \frac{\xi_2 (\xi_1 A_4 A_1 - \xi_1 A_4^2 + A_2 \xi_2)}{(A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) \xi_3} \end{cases}$$

On remarquera qu'il est facile de déduire le modèle cinématique 2D du modèle dynamique 2D en considérant une raideur des pneus infinie ($C_f = C_r = \infty$). Dans ce cas, nous avons $\alpha = \beta = \gamma = \mu = 0$ et on retrouve les anciennes variables d'état qui sont $z_1 = a$ et $z_2 = b$. Ceci justifie le choix des nouvelles variables d'état. Finalement en différentiant ces équations, nous obtenons le modèle d'état suivant :

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & \frac{A_2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)}{\xi_1 A_4 (\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2)} \\ -\frac{(\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2) A_2 \xi_2^2}{\xi_1 \xi_3 A_4 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} & \frac{A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha A_3}{\xi_1} \\ -\frac{\gamma (\xi_2 A_3 - A_5 \xi_1)}{\xi_1 \xi_3} \end{bmatrix} \delta \quad (4.39)$$

La matrice de commandabilité est donnée par :

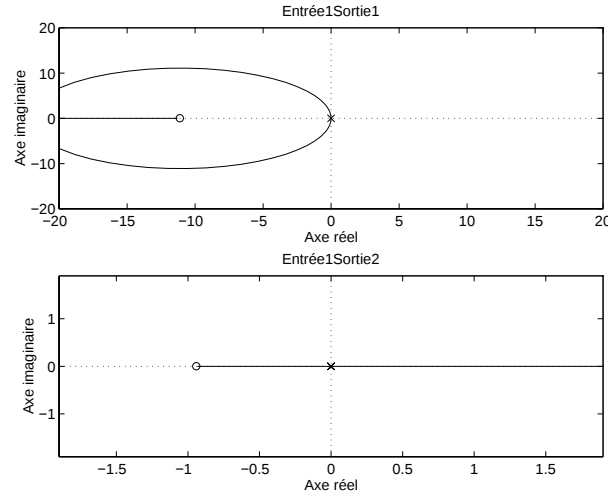
$$Q = \begin{bmatrix} -\frac{A_4 A_3}{\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2} & \frac{A_2 A_5}{\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2} \\ -\frac{A_4 (\xi_2 A_3 - A_5 \xi_1)}{\xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} & \frac{A_2 \xi_2 A_5}{\xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

De même, la matrice W s'exprime par :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

La matrice de gain est donnée à partir des expressions de Q et W en assimilant le comportement du système à celui du second ordre paramétré par ξ et ω_0 . Elle s'exprime par :

$$G : \begin{cases} g_1 = -\frac{(\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2) \omega_0 (2 \xi_2 \xi A_2 A_5 + \omega_0 A_4 \xi_2 A_3 - \omega_0 A_4 A_5 \xi_1)}{A_4 A_2 A_5^2 \xi_1} \\ g_2 = \frac{\xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) \omega_0 (2 \xi A_2 A_5 + A_3 \omega_0 A_4)}{A_4 A_2 A_5^2 \xi_1} \end{cases} \quad (4.42)$$

FIGURE 4.5 – *Lieu des racines du système non corrigé.*

La figure 4.5 montre le lieu des racines du modèle dynamique simplifié. Nous constatons que même avec le changement de variables considéré, nous retrouvons l'existence de pôles à l'origine. L'avantage d'un tel système est que sa correction nécessite un placement d'une seule paire de pôles.

4.2.3.3 Modèle simplifié avec commande en vitesse

Nous considérons le modèle simplifié précédent en introduisant le vecteur de commande en vitesse des roues $u = \dot{\delta}$ ainsi qu'une nouvelle variable d'état notée $z_3 = \delta$. Le modèle se transforme et s'exprime par :

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & \frac{A_2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)}{\xi_1 A_4 (\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2)} & \frac{\alpha A_3}{\xi_1} \\ -\frac{(\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2) A_2 \xi_2^2}{\xi_1 \xi_3 A_4 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} & \frac{A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & -\frac{\gamma (\xi_2 A_3 - A_5 \xi_1)}{\xi_1 \xi_3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (4.43)$$

Dans ce cas, la matrice de commandabilité devient :

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{A_4 A_3}{\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2} & \frac{A_2 A_5}{\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2} \\ 0 & -\frac{A_4 (\xi_2 A_3 - A_5 \xi_1)}{\xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} & \frac{A_2 \xi_2 A_5}{\xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

et la matrice W est donnée par :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Finalement, les expressions des gains g_i sont :

$$G : \begin{cases} g_1 = -\frac{(\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2) \omega_0 (2 A_2 \xi_2 A_5 \xi \omega_1 + A_2 \xi_2 A_5 \omega_0 + \omega_0 \omega_1 A_4 \xi_2 A_3 - \omega_0 \omega_1 A_4 A_5 \xi_1)}{A_5^2 A_4 \xi_1 A_2} \\ g_2 = \frac{\xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) \omega_0 (2 A_2 A_5 \xi \omega_1 + A_2 A_5 \omega_0 + A_3 \omega_0 \omega_1 A_4)}{A_5^2 A_4 \xi_1 A_2} \\ g_3 = 2 \xi \omega_0 + \omega_1 \end{cases} \quad (4.46)$$

Dans les deux derniers cas, la commande est utilisée efficacement dans le sens où les pôles se trouvent tous à la même distance de l'origine. D'un autre côté, le changement de variable nous a permis de garder les caractéristiques du système puisque nous exploitons toujours les mesures (a, b) données par la vision.

4.2.3.4 Modèle simplifié discret avec retard

Dans les applications en conditions réelles, la qualité d'un asservissement est fortement lié à la manière d'implanter la loi de commande. Généralement, le résultat de la commande risque d'être affecté par les différents retards introduits par les traitements ainsi que par le type des capteurs utilisés dû à leur technologie. Ainsi, le caractère échantillonné de la commande est souhaitable. De même la modélisation du retard au niveau de la commande.

Nous pensons qu'il est intéressant d'étudier la commande de ces deux points de vue. La procédure que nous avons adopté consiste à discrétiser le système continu avec une commande discrète. Les équations d'état s'expriment par :

$$\dot{Z} = AZ + Bu^+(k-d) \quad (4.47)$$

où $Z = (z_1 \ z_2 \ z_3)^T$. La solution d'une telle équation est de la forme (voir § A.1.1.2) :

$$Z(k+1) = e^{AT} Z(k) + \left(\int_0^T e^{A(T-\sigma)} B \right) u^+(k-d) \quad (4.48)$$

On note $A^* = e^{AT}$ et $B^* = \int_0^T e^{A(T-\sigma)} B$.

On désire boucler notre système à travers un gain K telle que $u^+(k-d) = -KZ(k)$ de sorte que l'on ait l'équation suivante :

$$Z(k+1) = (A^* - B^*K) Z(k) \quad (4.49)$$

avec $K = (k_1 \ k_2 \ k_3)^T$ sont les gains choisis tels que le système possède un comportement du troisième ordre possédant un pôle réel et deux pôles conjugués. Son équation caractéristique en continu est de la forme $(\lambda^2 + 2\xi\omega_0\lambda + \omega_0^2)(\lambda + \omega_1)$. Pour obtenir une telle fonction de transfert en boucle fermée il suffit d'exprimer l'entrée de commande $u^+(k)$ en fonction de l'état Z .

L'équation discrète (4.48) s'écrit de la façon suivante :

$$Z(k+1) = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Z(k) + \begin{bmatrix} g \\ h \\ 2 \end{bmatrix} u^+(k-d) \quad (4.50)$$

avec les notations suivantes :

$$\begin{aligned} a &= 1 - \frac{TA_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & b &= \frac{TA_2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)}{A_4 \xi_1 (\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2)} \\ c &= \frac{T(A_2 TA_5 - 2 A_4 A_3)}{2 \xi_1 A_4 A_1 + 2 A_2 \xi_2} & d &= -\frac{T(\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2) A_2 \xi_2^2}{\xi_1 \xi_3 A_4 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} \\ e &= 1 + \frac{TA_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & f &= \frac{T(2 A_5 A_4 \xi_1 - 2 A_4 \xi_2 A_3 + TA_2 \xi_2 A_5)}{2 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) \xi_3} \\ g &= \frac{T(A_2 TA_5 + 2 A_4 A_3)}{2 \xi_1 A_4 A_1 + 2 A_2 \xi_2} & h &= \frac{T(2 A_4 \xi_2 A_3 - 2 A_5 A_4 \xi_1 + TA_2 \xi_2 A_5)}{2 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) \xi_3} \end{aligned}$$

La matrice de commandabilité Q ainsi que la matrice W sont exprimées comme suit :

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & \frac{T(A_2 TA_5 - 2 A_4 A_3)}{2 \xi_1 A_4 A_1 + 2 A_2 \xi_2} & \frac{T(3 A_2 TA_5 - 2 A_3 A_4)}{2 \xi_1 A_4 A_1 + 2 A_2 \xi_2} \\ 0 & \frac{T(2 A_4 A_5 \xi_1 - 2 A_4 \xi_2 A_3 + TA_2 \xi_2 A_5)}{2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} & \frac{T(2 A_4 A_5 \xi_1 - 2 A_4 \xi_2 A_3 + 3 TA_2 \xi_2 A_5)}{2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 3 & -3 \\ 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

En assimilant le comportement du système à celui d'un troisième ordre dont les pôles zp_1 , zp_2 et zp_3 sont donnés par :

$$\begin{aligned} zp_1 + zp_2 &= 2e^{-\xi\omega_0 T} \cos \omega_0 T \sqrt{1 - \xi^2} \\ zp_1 zp_2 &= e^{-2\xi\omega_0 T} \\ zp_3 &= e^{-\omega_1 T} \end{aligned}$$

Ce qui donne comme coefficients du polynôme caractéristique en discret :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -(zp_1 + zp_2 + zp_3) \\ \lambda_2 &= zp_1 zp_2 + zp_3(zp_1 + zp_2) \\ \lambda_3 &= -zp_1 zp_2 zp_3 \end{aligned}$$

On trouve :

$$\left\{ \begin{aligned} k_1 &= \frac{a_4 (21 a_3 - 30 a_1 + 30 a_2) \lambda_1}{a_8} + \frac{a_4 (8 a_1 - 8 a_2 - 6 a_3) \lambda_2}{a_8} + \frac{a_4 (a_3 + 2 a_2 - 2 a_1) \lambda_3}{a_8} + \frac{a_4 (116 a_1 - 82 a_3 - 116 a_2)}{a_8} \\ k_2 &= -\frac{a_7 (21 a_6 - 30 a_5) \lambda_1}{a_8} - \frac{a_7 (8 a_5 - 6 a_6) \lambda_2}{a_8} - \frac{a_7 (a_6 - 2 a_5) \lambda_3}{a_8} - \frac{a_7 (116 a_5 - 82 a_6)}{a_8} \\ k_3 &= \lambda_1 - 3 \end{aligned} \right. \quad (4.53)$$

en introduisant les notations :

$$\begin{aligned} a_1 &= A_4 \xi_2 A_3 & a_2 &= A_4 A_5 \xi_1 & a_3 &= T A_2 \xi_2 A_5 & a_4 &= \xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2 \\ a_5 &= A_3 A_4 & a_6 &= A_2 T A_5 & a_7 &= \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) & a_8 &= 2 T^2 A_2 A_5^2 A_4 \xi_1 \end{aligned}$$

Pour le moment, nous n'avons déterminé que la commande en $u^+(k-d) = -KZ(k)$. Maintenant nous allons exprimer la commande à l'instant présent $u^+(k)$. Pour cela, il suffit de faire un simple décalage de l'état Z du nombre d'échantillons d correspondant au retard. On peut donc écrire de façon équivalente :

$$u^+(k) = -KZ(k+d) \quad (4.54)$$

En remplaçant $Z(k+d)$ par la forme récurrente développée en annexe A par l'équation (A.20), on trouve :

$$u^+(k) = -K e^{AdT} Z(k) - K \sum_{i=1}^d e^{(i-1)AT} B^* u^+(k-i) \quad (4.55)$$

En considérant l'équation (4.55), on peut finalement exprimer la forme générale de commande en fonction de d par le retour d'état suivant :

$$u^+(k) = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & \cdots & g_{d+3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \\ z_3(k) \\ u(k-1) \\ \vdots \\ u(k-d) \end{pmatrix}$$

Les trois premiers gains $(g_1, g_2, g_3)^T = -K e^{dT A}$ sont facilement calculables en fonction des gains k_i en effectuant le produit matriciel suivant :

$$-K \begin{bmatrix} 1 - \frac{dT A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & \frac{dT A_2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)}{A_4 \xi_1 (\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2)} & \frac{dT (A_2 dT A_5 - 2 A_3 A_4)}{2 \xi_1 A_4 A_1 + 2 A_2 \xi_2} \\ -\frac{dT (\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2) A_2 \xi_2^2}{\xi_1 \xi_3 A_4 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} & 1 + \frac{dT A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & \frac{dT (2 A_4 A_5 \xi_1 - 2 A_4 \xi_2 A_3 + dT A_2 \xi_2 A_5)}{2 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) \xi_3} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Il reste alors à calculer le terme $-K \sum_{i=1}^d e^{(i-1)AT} B^* u^+(k-i)$ correspondant au retard dans la commande ce qui peut s'écrire sous la forme dépendante de d suivante :

$$\begin{pmatrix} g_4 \\ g_5 \\ \vdots \\ g_{d+3} \end{pmatrix} = -K \begin{pmatrix} I \\ e^{AT} \\ \vdots \\ e^{(d-1)AT} \end{pmatrix} B^* \quad (4.57)$$

tels que :

$$e^{iAT} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{iT A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & \frac{iT A_2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)}{A_4 \xi_1 (\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2)} & \frac{iT (A_2 i T A_5 - 2 A_3 A_4)}{2 \xi_1 A_4 A_1 + 2 A_2 \xi_2} \\ -\frac{iT (\xi_1 A_4 A_1 + A_2 \xi_2) A_2 \xi_2^2}{\xi_1 \xi_3 A_4 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} & 1 + \frac{iT A_2 \xi_2}{\xi_1 A_4} & \frac{iT (2 A_4 A_5 \xi_1 - 2 A_4 \xi_2 A_3 + i T A_2 \xi_2 A_5)}{2 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2) \xi_3} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B^* = \begin{bmatrix} -\frac{T (A_2 T A_5 + 2 A_3 A_4)}{2 \xi_1 A_4 A_1 + 2 A_2 \xi_2} \\ -\frac{T (2 A_4 \xi_2 A_3 - 2 A_4 A_5 \xi_1 + T A_2 \xi_2 A_5)}{2 \xi_3 (A_2 \xi_2 - \xi_1 A_4^2)} \\ 0 \end{bmatrix}$$

La commande simplifiée assure un placement d'un pôle réel et deux pôles conjugués amortis de vecteur d'état $Z = (z_1, z_2, z_3)^T$. Dans la pratique, à partir de la vision, nous n'avons accès qu'au vecteur de mesure $X = (\dot{a}, a, \dot{b}, b)^T$. Cependant, il est trivial d'exprimer cette commande en fonction de X en utilisant le nouveau paramétrage donnée par (4.38).

4.3 Synthèse de la commande dans l'espace H^∞

Nous présentons une commande robuste en utilisant le modèle cinématique du véhicule. Pour cela, on définit une fonction de transfert qui représente le modèle nominal ainsi qu'une fonction de transfert de l'incertitude non-structurée additive. Cette dernière comprend les paramètres susceptibles de varier qui sont : l'inclinaison de la caméra et sa hauteur puisque seuls ces paramètres se retrouvent dans le modèle étudié. Le schéma d'asservissement que nous adoptons pour la mise en œuvre de la loi de commande dans l'espace H^∞ est présenté sur la figure 4.6.

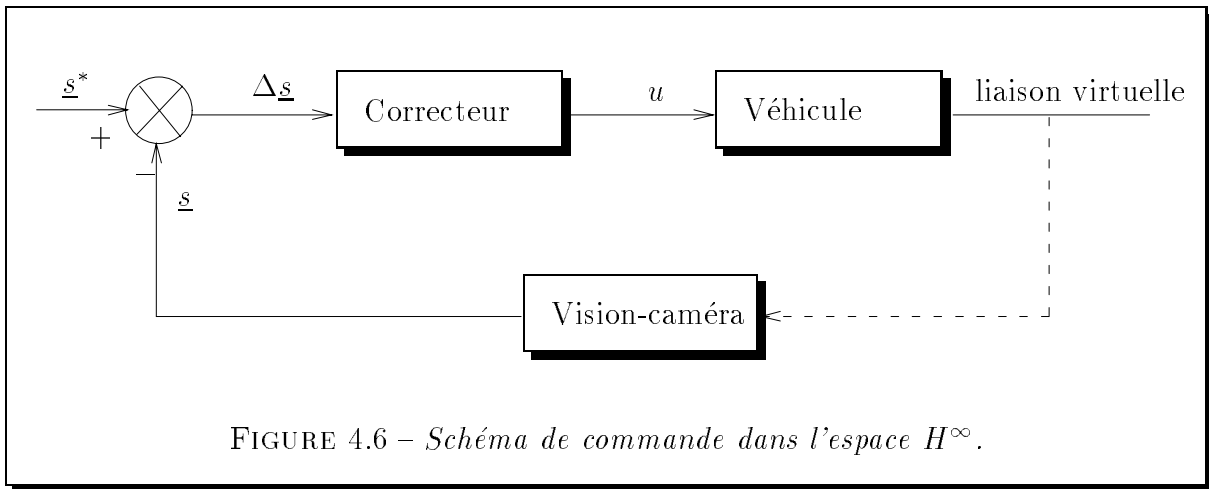


FIGURE 4.6 – Schéma de commande dans l'espace H^∞ .

4.3.1 Fonction de transfert

Pour déterminer les deux fonctions de transfert régissant le véhicule, on part des équations du modèle d'état décrivant la cinématique pour lesquelles on applique la formule de passage de la représentation d'état à la fonction de transfert suivante :

$$F_T(p) = C(pI - A)^{-1}B \quad (4.58)$$

Ensuite, nous déterminons la limite de l'incertitude du système nominal dans le domaine fréquentiel. Pour cela, nous exprimons l'amplitude du module de $r(j\omega)$ suivant :

$$|r(j\omega)| = |F_0(p) - F(j\omega)| \quad (4.59)$$

Nous représenterons, dans la synthèse du contrôleur, le format de données $|r(p)/F_0(p)|$ parce qu'il facilite le choix de $r(p)$ en fonction de $F_0(p)$.

Par application de (4.58) au modèle d'état représenté par l'équation (4.2), on aboutit aux deux fonctions de transfert suivantes :

$$\begin{cases} F_1(p) = -\frac{a}{\delta} = \frac{V^2}{\xi_1 L p^2} \\ F_2(p) = \frac{b}{\delta} = \frac{V^2 \xi_2 + p \xi_1 V}{\xi_1 p^2 L \xi_3} \end{cases} \quad (4.60)$$

avec :

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{h f_y}{f_x} \\ \xi_2 &= -\frac{\alpha f_y}{f_x} \\ \xi_3 &= \frac{1}{f_x} \end{aligned}$$

Nous considérons comme modèle nominal la fonction de transfert $F_2(p) = F_0(p)$ liée à la sortie $y = b$ puisqu'elle exprime les paramètres incertains α et h . Notons par $\Delta\alpha$ les variations de l'angle de tangage et par Δh celles de la hauteur de la caméra. On aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} F(p) = F_0(p) + \Delta F(p) \\ \frac{\Delta F(p)}{F_0(p)} = \frac{V \Delta \xi_2 + p \Delta \xi_1}{V \xi_2 + p \xi_1} + \frac{\Delta \xi_1}{\xi_1} \\ \Delta \xi_2 = -\frac{\Delta \alpha f_y}{f_x} \\ \Delta \xi_1 = \frac{\Delta h f_y}{f_x} \end{cases} \quad (4.61)$$

4.3.2 Synthèse du contrôleur robuste

L'idée de base pour synthétiser le contrôleur robuste consiste à étudier l'évolution du rapport $|r(p)/F_o(p)|$ en fonction de la fréquence. On détermine l'amplitude maximale de ce rapport, qui doit être inférieure à 1 et qui dépend des plages de variations des paramètres incertains du modèle. Dans notre cas, les résultats de cette représentation sont présentés en figure 4.7 pour une variation $\Delta\alpha = 6 \text{ deg}$ et $\Delta h = 20 \text{ cm}$ avec comme valeur de l'amplitude maximale de $k = 0.78$. Sur la figure 4.8 la même représentation est effectuée sans variation de Δh qui donne $k = 0.84$.

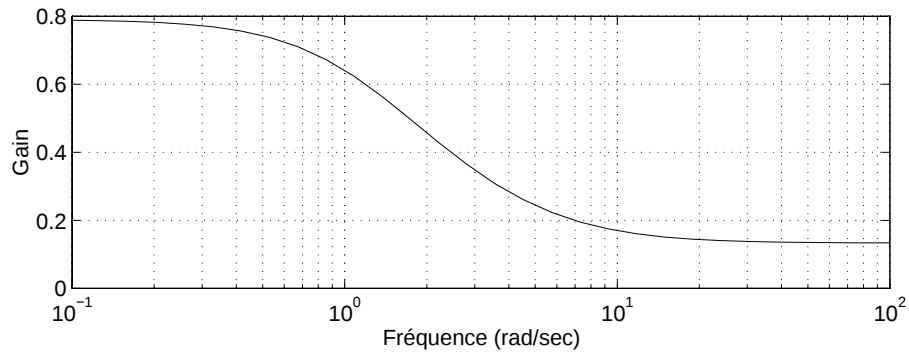


FIGURE 4.7 – $|r(p)/F_o(p)|$ en fonction de la fréquence pour $\Delta\alpha = 6 \text{ deg}$ et $\Delta h = 20 \text{ cm}$.

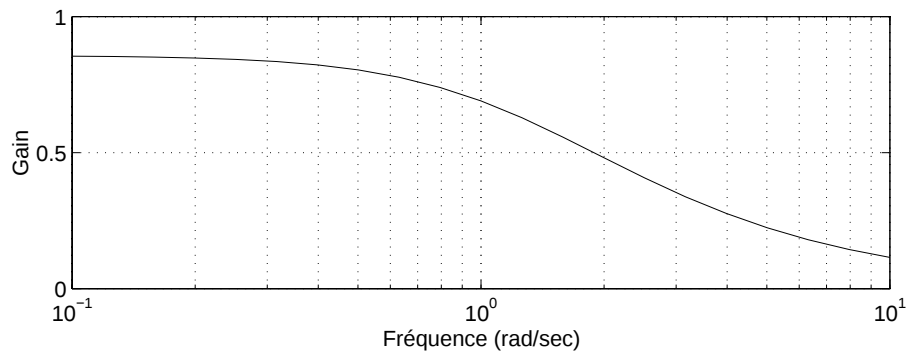


FIGURE 4.8 – $|r(p)/F_o(p)|$ en fonction de la fréquence pour $\Delta\alpha = 6 \text{ deg}$ et $\Delta h = 0 \text{ cm}$.

En utilisant les données décrites sur la figure 4.7, la limite d'incertitude maximale du

système peut être exprimée par :

$$r(p) = k F_0(p) \quad (4.62)$$

Avec cette valeur limite, une commande stabilisatrice peut être dégagée s'il existe une fonction réelle strictement bornée solution de l'équation (A.56). Du moment que la fonction de transfert régissant le système possède un pôle double à l'origine, on utilise la démarche décrite dans §A.2.5, mais un peu modifiée. On définit pour cela :

$$F_0(p) = \frac{\tilde{F}(p)}{p^2} \quad (4.63)$$

où $\tilde{F}(p)$ est une fonction de transfert stable. On définit de façon similaire $r(p)$ et $q(p)$ telles que :

$$\begin{cases} r(p) = \frac{r_m^*(p)}{p^2} \\ q(p) = p^2 \tilde{q}(p) \end{cases} \quad (4.64)$$

où $r_m^*(p)$ est une fonction de transfert à minimum de phase et $\tilde{q}(p) \in H^\infty$. A partir des équations (4.64) on peut écrire :

$$q(p)r(p) = \tilde{q}(p)r_m^*(p) = u(p) \quad (4.65)$$

de même

$$F_0(p)q(p) = \tilde{F}(p)\tilde{q}(p) \quad (4.66)$$

Du fait que le système possède deux pôles à l'origine, il y a donc deux points d'interpolation qui s'écrivent par :

$$\frac{r_m^*(\alpha_i)}{\tilde{q}(\alpha_i)} = \frac{k r_m^*(\alpha_i)}{r_m^*(\alpha_i)} = k, \quad \alpha_i = 0 \quad (4.67)$$

En outre, il existe un autre point d'interpolation à l'infini parce que $r(p)$ possède un degré relatif de 1. En effet, une fonction réelle strictement bornée $u(p)$ qui rencontre ces conditions d'interpolation peut s'exprimer par :

$$u(p) = \frac{k'(p + \alpha_1)}{(p + \alpha_2)(p + \alpha_3)(p + \alpha_4)} \quad (4.68)$$

tels que α_i avec $i = 1..4$ sont des pôles réels, et k' est une constante positive. Elles doivent être fixées en fonction des conditions d'interpolation (4.67).

En utilisant (4.65), on peut facilement déduire :

$$q(p) = \frac{k' \xi_1 L \xi_3 p^2 (p + \alpha_1)}{kV (p + \alpha_2) (p + \alpha_3) (p + \alpha_4) (p\xi_1 + V\xi_2)} \quad (4.69)$$

Le contrôleur stabilisateur robuste pour b est donné par :

$$c(p) = \frac{K \xi_1 L \xi_3 p^2 (p + \alpha_1)}{V (p\xi_1 + V\xi_2) [p^3 + p^2\lambda_1 + p\lambda_2 + \lambda_3]} \quad (4.70)$$

avec :

$$\begin{aligned} K &= \frac{k'}{k} \\ \lambda_1 &= \alpha_4 + \alpha_3 + \alpha_2 \\ \lambda_2 &= \alpha_3 \alpha_4 + \alpha_2 \alpha_4 + \alpha_2 \alpha_3 - K \\ \lambda_3 &= \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 - K \alpha_1 \end{aligned}$$

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, deux schémas d'asservissement visuel ont été mis en évidence selon le type de commande appliqué. Le premier schéma de commande est dégagé à partir du formalisme d'état où des gains se présentent sous forme de coefficients constants. Le second schéma de commande permet de fournir un correcteur présenté sous forme de fonction de transfert.

Nous avons présenté deux types de mises en œuvre de commandes dans l'espace d'état, selon le modèle du véhicule utilisé. Les modèles d'état élaborés sont exprimés dans l'espace image dans le sens où le vecteur d'état est composé essentiellement des variables 2D liées au repère de l'image. Pour cela, nous intégrons non seulement le modèle d'interaction 2D/3D, mais aussi le modèle du véhicule. Une commande cinématique est généralisable à un robot mobile à deux roues directrices. La commande dynamique est appliquée particulièrement à un véhicule automobile. L'analyse des modèles d'état est effectuée par les tracés des lieux des racines afin d'observer l'évolution de la position des pôles et de pouvoir optimiser leur placement. Nous avons aussi dégagé les conditions de stabilité en examinant la matrice de commandabilité dans chaque cas.

La mise en œuvre de la commande dans l'espace fréquentiel nécessite un modèle donné sous forme de fonction de transfert. La robustesse souhaitée est définie en fonction du modèle d'incertitude non-structurée que nous avons déterminé. La mise en œuvre de la méthode est faite en employant le modèle cinématique du véhicule. Les paramètres incertains sont l'angle d'inclinaison de la caméra ainsi que sa hauteur. À partir des deux modèles, une analyse fréquentielle de leur rapport permet de définir la limite d'incertitude maximale du système. À partir de cette valeur, la recherche d'un correcteur stabilisateur nécessite de remplir des conditions d'interpolation. Nous avons donné une formulation générale du correcteur qui dépend de cette limite ainsi que des conditions d'interpolation.

Les éléments présentés dans ce chapitre vont être appliqués à des cas concrets en simulation et en réel. Nous abordons les résultats obtenus dans le prochain chapitre.

Chapitre 5

Résultats de simulation

*Let us realize that what happens around us
is largely outside our control, but that
the way we choose to react to it
is inside our control.
Quoted by Petty in “Apples of gold”*

Ce chapitre rassemble les différents résultats obtenus en simulation en validant les modèles de commande dans l'espace d'état et dans l'espace fréquentiel. Deux applications de guidage nous intéressent dans notre étude. La première entre dans le cadre de la conduite automatique d'un véhicule sur route. Dans ce cas, on considère que celui-ci se déplace sur une autoroute à deux voies dont les dimensions sont parfaitement connues. Par conséquent, la projection dans l'image de l'univers routier est représentée par trois droites se coupant en un point de fuite. Chacune donne une information relative à une bande de la signalisation horizontale de l'autoroute. La seconde consiste à asservir un véhicule agricole sur un champ. La scène est constituée par une ligne droite représentant l'interface fauchée et non-fauchée dans un champ agricole.

5.1 Les algorithmes de simulation

De nombreuses lois de commande ont été simulées car il est nécessaire de :

- mettre au point des lois de commande,
- valider la convergence de la boucle de commande,
- comparer les résultats des différentes lois de commande.

Ces différentes simulations nécessitent d'adapter les algorithmes de commande aux applications d'asservissement visuel. Pour cela le mouvement de la caméra caractérisé

par les deux vitesses $(\dot{x}, \dot{\psi})$, issue du modèle cinématique ou dynamique du véhicule, est considéré comme un déplacement incrémental. Ainsi à chaque itération, c'est-à-dire après chaque acquisition par la caméra, la nouvelle position est calculée à partir de la situation courante du modèle du véhicule et de la commande à lui envoyer. Dans les simulations de la conduite automatique sur route, nous considérons une période d'échantillonnage correspondant au temps réel vidéo (40 ms) pour l'application de la conduite automatique sur route, et à 250 ms pour l'application de la conduite agricole, période à laquelle le système de vision doit fournir les données visuelles.

Soit une situation $\underline{s}$ du véhicule à l'itération k , sa nouvelle situation à l'itération $k+1$ peut être donnée par :

$$\underline{s}_{k+1} = \underline{s}_k \begin{pmatrix} \mathcal{R}_c & T_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

avec R_c et T_c les deux mouvements de déplacement latéral du véhicule.

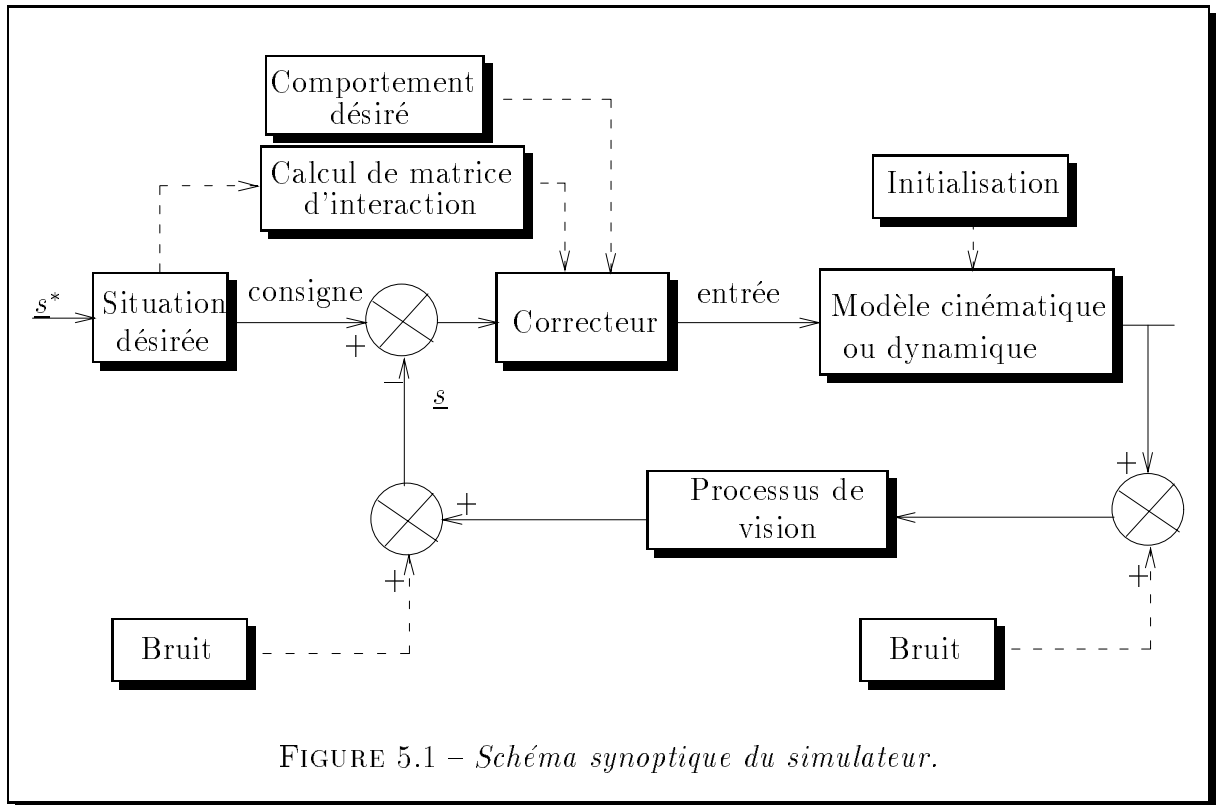
Algorithme : selon le schéma synoptique de la figure 5.1, les différentes étapes d'un algorithme d'asservissement visuel pour un robot mobile sont :

- (1) choix du modèle désiré dans l'image et calcul des informations visuelles $\underline{s}^*$ associées,
- (2) construction de la matrice d'interaction associée au modèle de référence : $L_{|\underline{s}=\underline{s}^*}^T$,
- (3) choix de la situation initiale du véhicule par un choix de la position latérale x et de son orientation ψ , ce qui fixe la valeur initiale des informations visuelles du modèle $\underline{s}$,
- (4) expression des différents gains de commande g_i et de la consigne r pour l'asservissement dans l'espace d'état ou de la fonction de transfert $c(p)$ dans l'espace H^∞ en fonction du comportement désiré (réglage des pôles du système),

[**faire** (boucle d'asservissement)

- (4.1) calcul de l'information visuelle courante $\underline{s}$,
- (4.2) calcul de la consigne à envoyer au véhicule,
- (4.3) calcul de la nouvelle situation du véhicule (utilisation de l'expression (5.1)).

] **tant que la situation désirée n'a pas été atteinte**



Concernant cet algorithme, une variante de l'étape (4.3) consiste à ajouter un bruit afin de se rapprocher des manipulations réelles sur notre site expérimental. Deux bruits peuvent être dissociés :

- un bruit sur les nouvelles positions du véhicule, correspondant aux erreurs dans sa modélisation et également aux imprécisions dans la commande,
- un bruit sur les valeurs des informations visuelles générées lors de l'acquisition de l'image, dû aux traitements.

Nous avons ainsi testé la robustesse des lois de commande vis-à-vis du bruit ajouté aux valeurs théoriques.

De plus, si l'on désire calculer la matrice d'interaction à chaque position du véhicule ($L_{|s=s^*}^T$), donc à chaque boucle de commande, les étapes (3) et (4) de l'algorithme précédent doivent être intégrées dans la boucle d'asservissement. Cette démarche n'est bien évidemment pas toujours possible car la matrice d'interaction est souvent construite en fonction des paramètres 3D des éléments de la scène, ainsi une étape de reconstruction est nécessaire à chaque itération.

Les données du modèle du véhicule utilisé correspondent à celles d'un véhicule qui a servi de base expérimentale dans le cadre d'une collaboration entre le L.A.S.M.E.A., le

Paramètre	Signification	Valeur nominale
M	Masse du véhicule	1200 (kg)
C_f, C_r	Raideur des pneus	50000 (kn/rd)
I_z	Moment d'inertie	2047 (kg. m ²)
V	Vitesse du véhicule	60 km/h
$L = L_f + L_r$	Longueur du véhicule	3 m
α	Inclinaison de la caméra	7 deg
T_s	Période d'échantillonnage	40 ms
h	Hauteur de la caméra	1.5 m
f_x	Focale en x	1300 pixel
f_y	Focale en y	1911 pixel

TABLEAU 5.1 – Valeurs des différents paramètres utilisés en simulation.

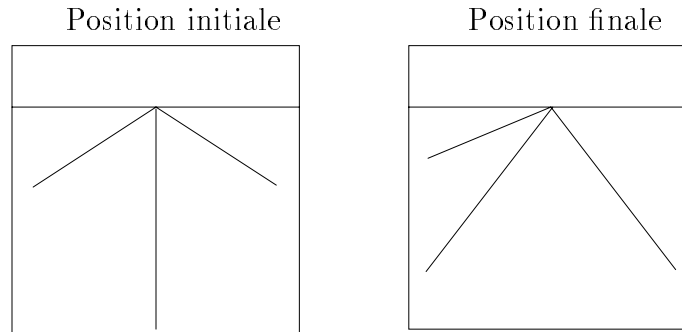
constructeur automobile P.S.A. et l'I.N.R.I.A. Les autres paramètres (inclinaison de la caméra, sa hauteur, la vitesse longitudinale et les paramètres intrinsèques de la caméra) sont ceux liés à une expérimentation en vraie grandeur. Ces différents paramètres sont mis en jeu pour la synthèse de lois cinématiques ou dynamiques. Ils sont rappelés sur le tableau 5.1.

5.2 Application de la commande cinématique

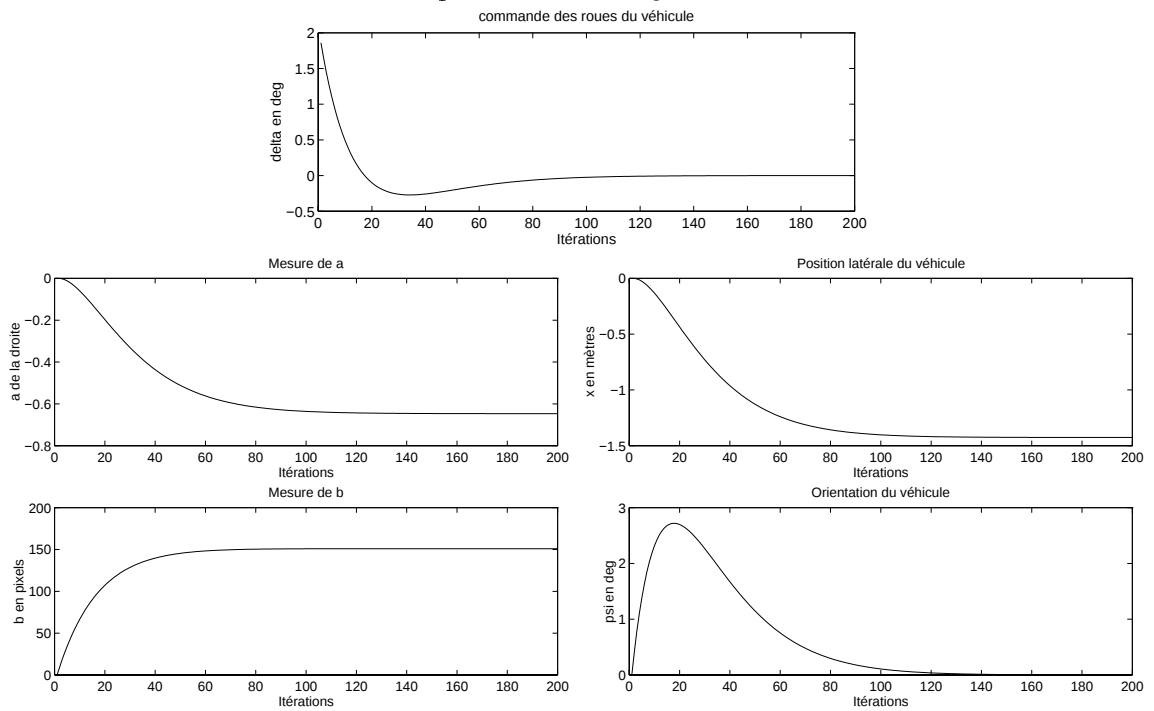
5.2.1 Utilisation du paramétrage (a, b)

Les résultats que nous proposons dans cette partie sont relatifs à la commande d'un véhicule automobile se déplaçant sur une autoroute constituée par deux voies de circulation [Khadraoui 95b].

Les simulations d'asservissements de la conduite automatique sont réalisées en utilisant un modèle trois droites à point de fuite, traité au § 3.5.1 du chapitre 4. L'initialisation de l'algorithme de commande consiste à fixer la position initiale du véhicule pour initialiser le modèle de route. De la même manière, on précise la situation de référence à atteindre avant de lancer la boucle d'asservissement. La figure 5.2 représente un exemple de situation initiale et finale que nous avons simulé. La tâche consiste à faire un positionnement centré sur la voie de circulation droite d'une autoroute.

FIGURE 5.2 – *Modèle à point de fuite.*

Échelon de 150 pixels en b avec $\xi = 0.9$ et $\omega_0 = 1.5$

FIGURE 5.3 – *Commande cinématique avec paramétrage (a, b) .*

Nous présentons sur la figure 5.3 les résultats d'une simulation pour une réponse à un échelon de 150 pixels sur la sortie du modèle d'état, représentée par le paramètre b de la droite.

Nous avons testé la robustesse de la loi de commande par rapport à la vitesse de déplacement longitudinal du véhicule V sans modifier les valeurs des gains obtenus par la méthode du placement de pôles. Nous constatons que d'après les résultats de la figure 5.4(a), les réponses sont correctes jusqu'à une vitesse de 120 km/h . En effet, à partir de 140 km/h , le système présente quelques oscillations. Par ailleurs, pour montrer l'effet du déplacement des pôles du système en boucle fermée, nous avons effectué le même test d'asservissement en faisant varier l'un des paramètres du système du second ordre ω_0 . Nous montrons qu'il est directement lié au temps de réponse du système. Donc, il est possible de modifier le comportement du système en agissant sur ce paramètre. La figure 5.4(b) montre que pour une vitesse longitudinale constante de 60 km/h , plus le paramètre ω_0 est petit plus la réponse est rapide et tend à présenter des oscillations.

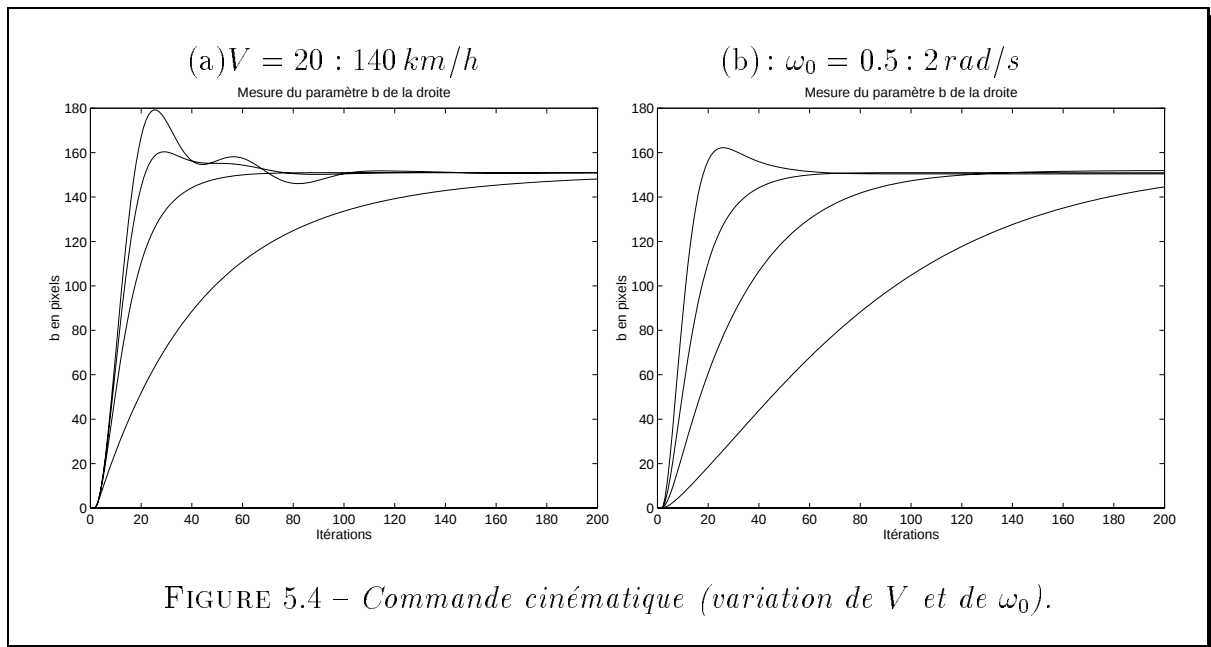


FIGURE 5.4 – *Commande cinématique (variation de V et de ω_0).*

La seconde méthode de commande qui consiste à commander en vitesse de l'angle des roues du véhicule a été simulée dans les mêmes conditions et pour la même tâche de positionnement. En revanche, elle nécessite l'installation d'un autre capteur permettant de mesurer en permanence l'angle des roues. La figure 5.5 montre le résultat de la convergence de la loi de commande vers le motif désiré dans l'image.

Échelon de 150 pixels en b avec $\xi = 0.9$, $\omega_1 = 10$ et $\omega_0 = 1.5$.

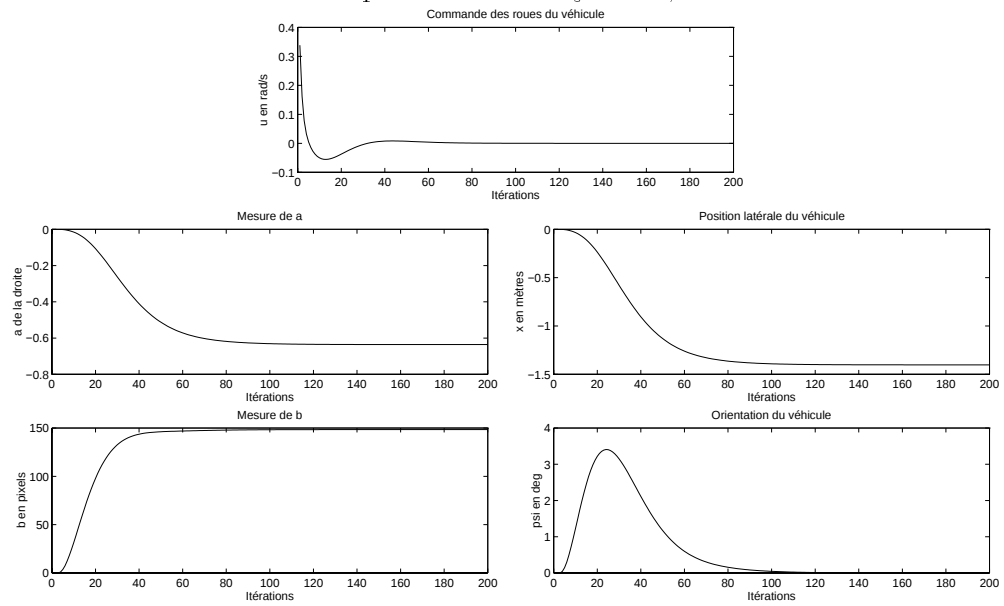


FIGURE 5.5 – *Commande cinématique en paramétrage (a, b, δ) .*

2% du bruit normal sur a , b , et δ

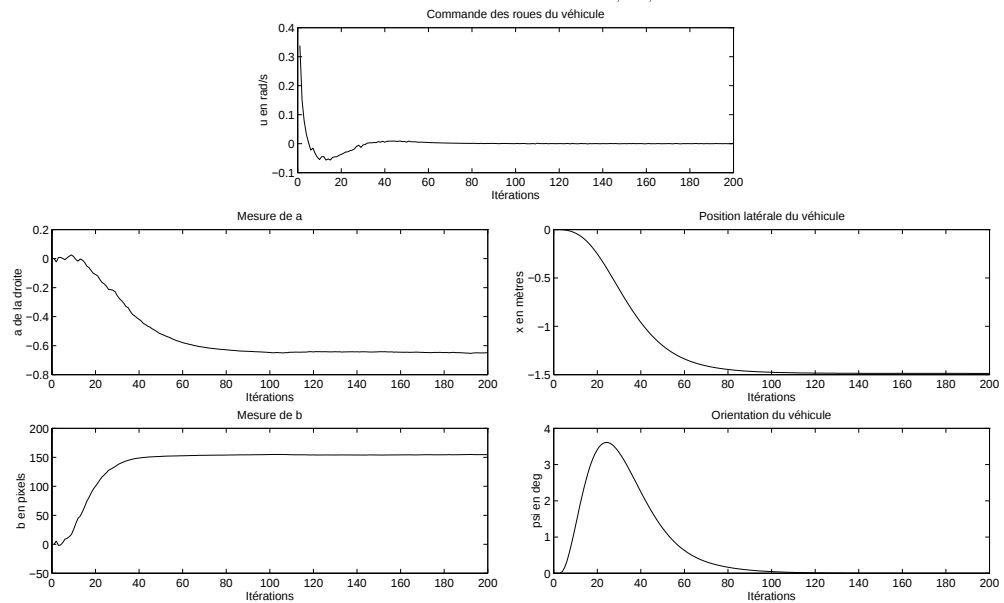


FIGURE 5.6 – *Commande cinématique avec bruit sur (a, b, δ) .*

Paramètre	Signification	Valeur
V	Vitesse moyenne	4 km/h
L	Longueur du véhicule	3.83 m
α	Inclinaison de la caméra	5 deg
T_s	Période d'échantillonnage	250 ms
h	Hauteur de la caméra	3 m

TABLEAU 5.2 – Valeurs des paramètres utilisés en simulation.

Le constat porte sur la robustesse de la loi de commande vis-à-vis du bruit de mesure. En effet, un bruit normal de 2% sur la mesure de l'état $\underline{s} = (a, b, \delta)^T$ n'affecte pas la trajectoire du véhicule. Les courbes de x et ψ de la figure 5.6 montrent que la trajectoire du véhicule est plus lisse que dans le cas précédent. Ce qui se traduirait par une conduite beaucoup plus souple.

5.2.2 Utilisation du paramétrage (θ, ρ)

Nous proposons maintenant d'autres résultats de simulation de la commande référencée vision appliquée au contrôle latéral d'un véhicule agricole [Khadraoui 95a]. Dans le chapitre 3, la modélisation cinématique du véhicule étudié concernait le cas où la direction se situe au niveau de l'essieu avant. Pour le cas du véhicule agricole, l'action de la direction s'effectue au niveau de l'essieu arrière. Par conséquent, une légère modification du modèle cinématique est donc nécessaire. La seule différence présentée par rapport à un véhicule automobile est que le sens de déplacement latéral est opposé pour une même action sur la direction. Le modèle s'exprime donc par les équations (5.2) suivantes :

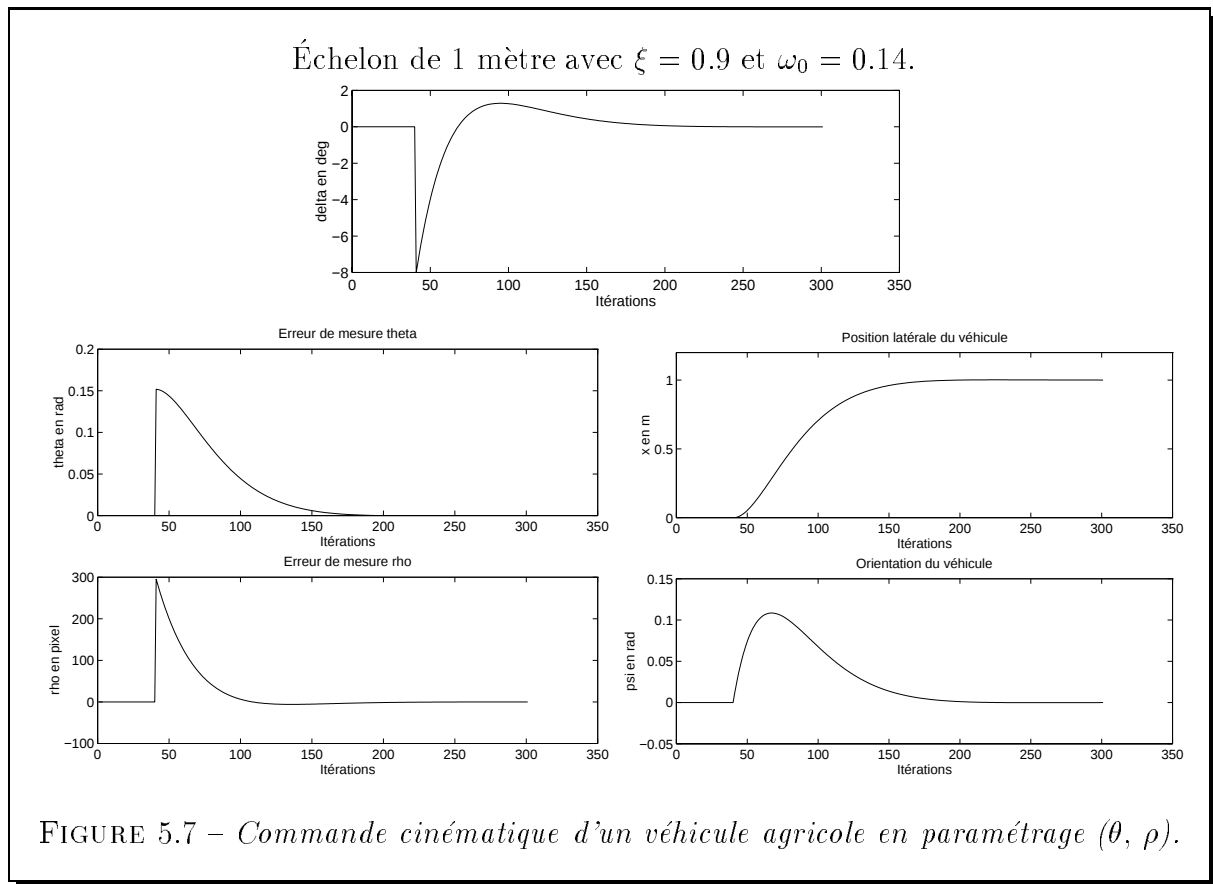
$$\begin{cases} \dot{\psi} &= -\frac{V}{L}\delta \\ \dot{x} &= -V\psi \end{cases} \quad (5.2)$$

Les différents paramètres utilisés en simulation sont donnés sur le tableau 5.2. La dynamique d'un tel véhicule est négligeable pour un fonctionnement sur un terrain plat puisque la vitesse de déplacement moyenne d'un engin en cours de travail est de 4 km/h. Nous avons fixé une période d'échantillonnage à 250 ms du fait que le système de traitement d'images utilisé en réel délivre les informations visuelles à cette cadence. Ce choix est fait dans le but de montrer la convergence de la loi de commande et de la comparer au cas réel que nous présenterons au §6.1.

La tâche d'asservissement que nous avons simulé consiste à suivre une ligne droite et de faire ensuite une réponse à un échelon de 1 mètre en position latérale. La figure

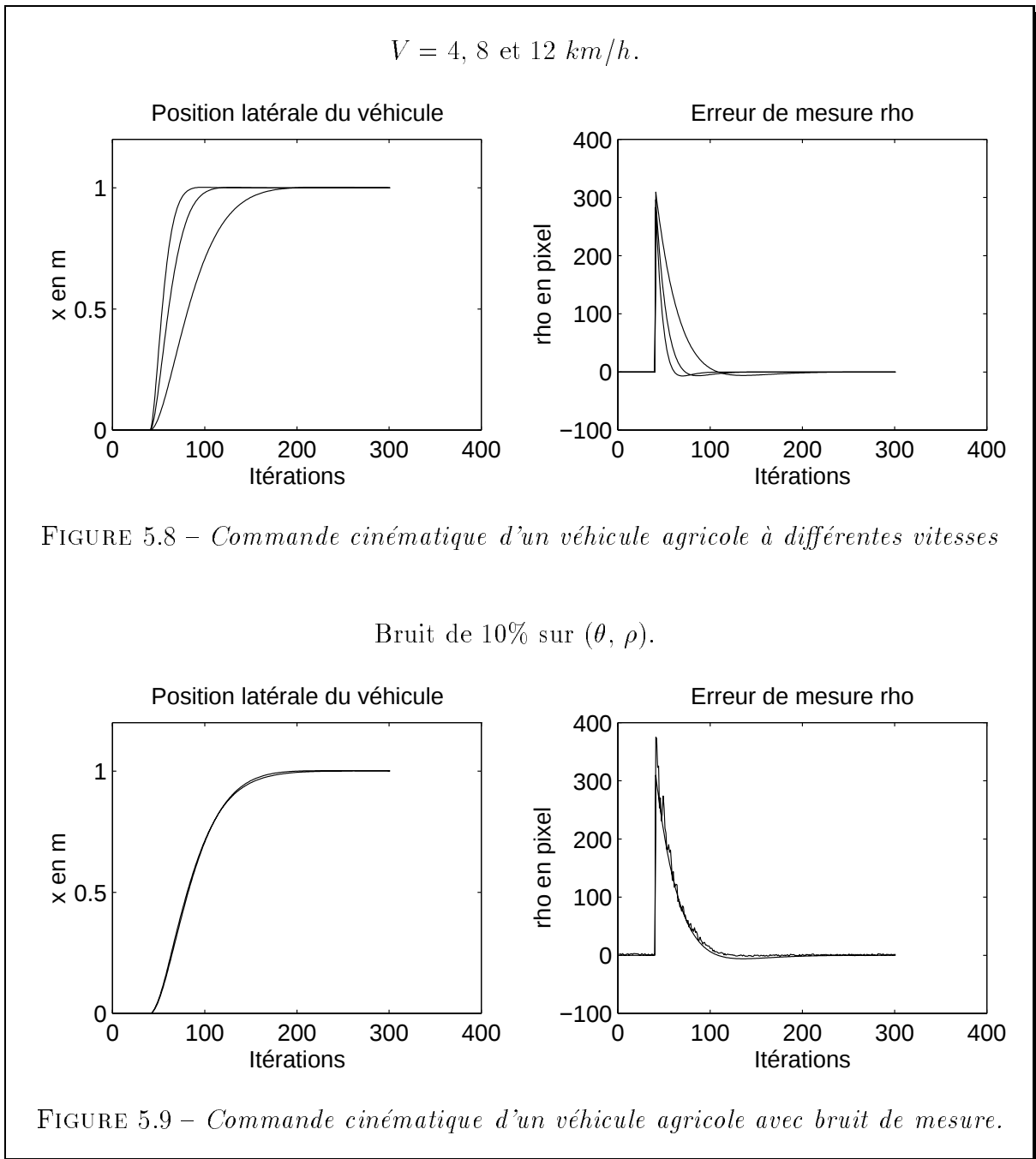
5.7 montre les différents résultats obtenus. Nous constatons que la commande se situe dans la fourchette tolérée par l'actionneur de la direction de l'engin agricole qui est de $[-10\text{ deg}, +10\text{ deg}]$. La commande est synthétisée en fixant les gains de la commande δ en choisissant les pôles du système du second ordre. La convergence est assurée au bout de 150 itérations approximativement.

Puisqu'il n'y a aucune régulation de la vitesse de déplacement longitudinal de l'engin, il est intéressant de tester la qualité de la convergence de la loi de commande en fonction des fluctuations de la vitesse du véhicule sans adaptation. Ceci est d'autant plus important que les gains de la commande sont fortement liés à cette vitesse. Le résultat du test est réalisé pour trois vitesses de $V = 4, 8$ et 12 km/h . La figure 5.8 montre que la convergence est toujours assurée avec un gain notable en temps de réponse de l'engin.



Par ailleurs, nous avons testé la robustesse de l'asservissement lorsque l'acquisition est bruitée. Une valeur de bruit de 10% sur la mesure du vecteur d'information visuelle (θ, ρ) est additionnée à sa valeur théorique. Nous remarquons qu'il n'y a pas d'incidence sur la réponse en position de l'engin. Ce bruit est complètement noyé dans le signal après l'avoir

injecté dans les gains de la commande. La courbe de réponse est totalement filtrée (voir Figure 5.9). La valeur de l'erreur 10% correspond à une erreur estimée lors des acquisitions sur la détection de la ligne fauchée et non-fauchée d'un champ agricole.

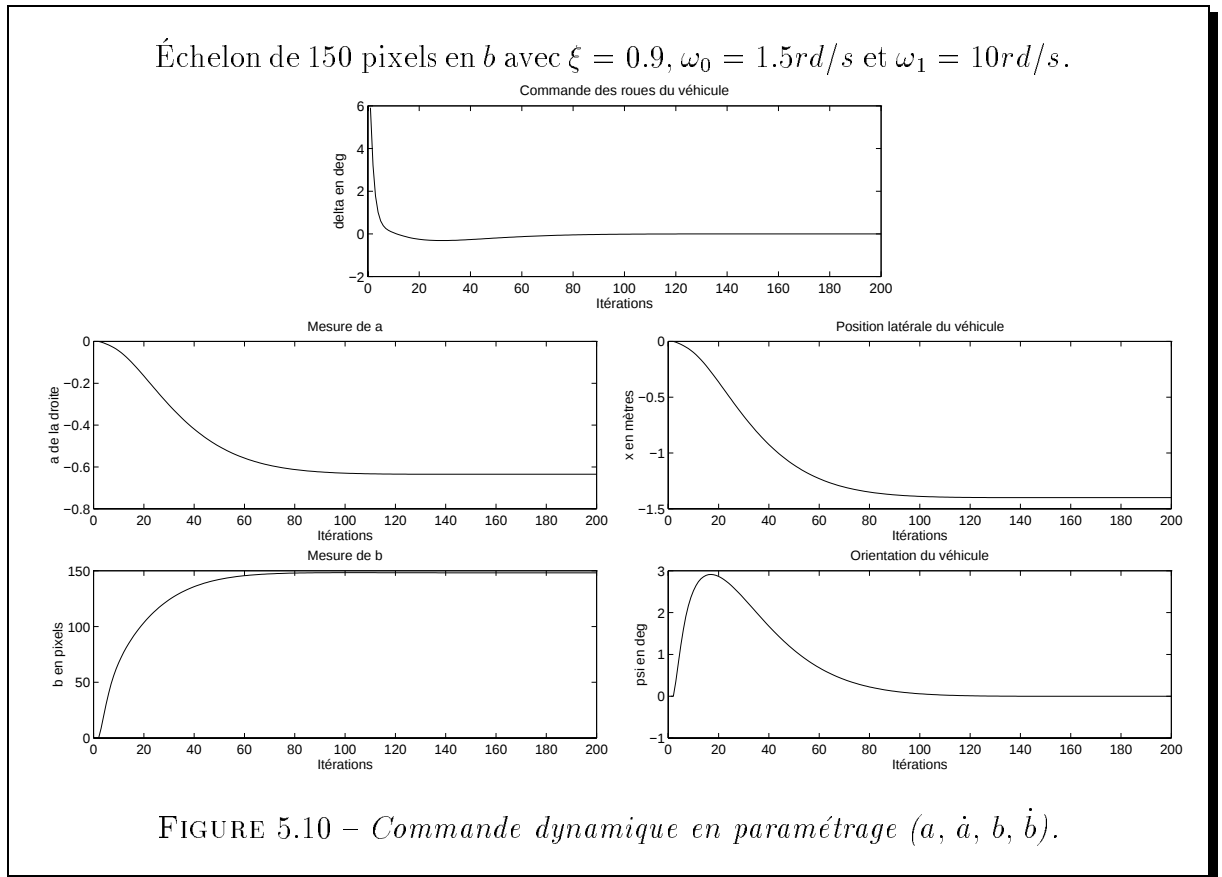


5.3 Application de la commande dynamique

La tâche à réaliser est le positionnement du véhicule par rapport à la signalisation au sol sur une autoroute. Nous testons les différents modèles de commande dynamiques élaborés dans la partie §4.2.3 afin d'évaluer l'influence de la dynamique dans le cas réel de l'asservissement visuel. Nous avons simulé la commande dynamique dans les mêmes conditions que la commande cinématique, mis à part que les modèles de commande tiennent compte des caractéristiques dynamiques du véhicule.

5.3.1 Utilisation du modèle complet

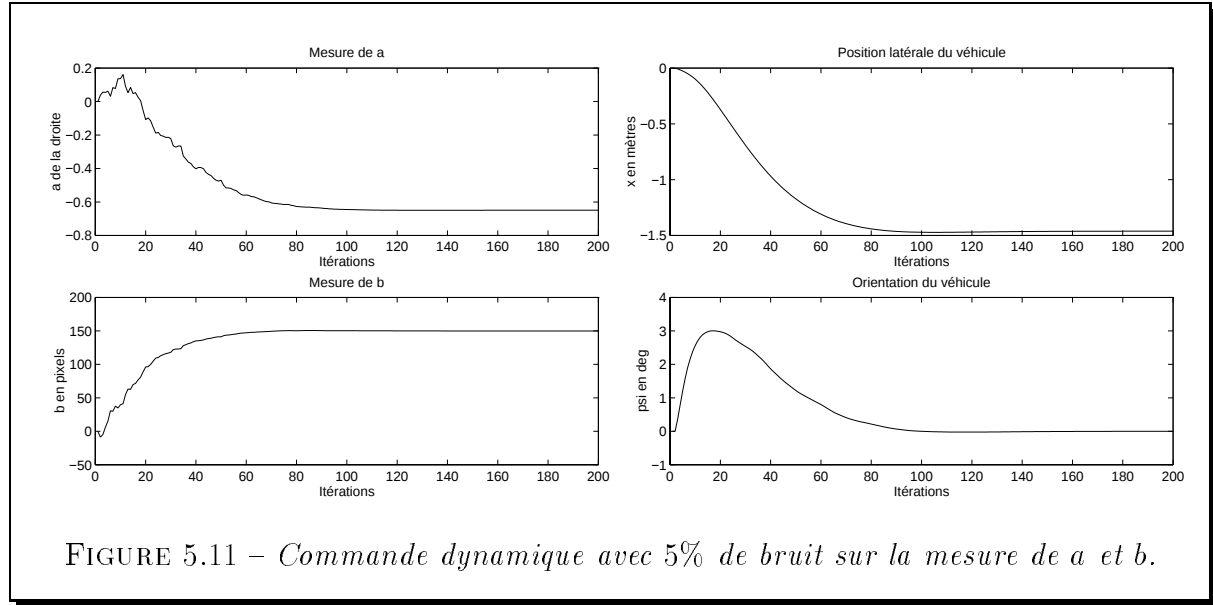
Dans ce cas, le vecteur d'état est donné par : $\underline{s} = (a, \dot{a}, b, \dot{b})^T$. Nous avons choisi de placer deux paires de pôles conjugués sur la partie gauche du plan complexe.



La figure 5.10 montre la faisabilité de la commande dynamique dans l'espace image. La convergence est assurée avec les mêmes performances que la commande cinématique

pour des vitesses de déplacement longitudinale faibles jusqu'à 60 km/h.

En contrepartie, cette loi est beaucoup plus robuste au bruit que dans le cas d'une commande cinématique avec une commande en position de l'angle des roues ($u = \delta$). En effet, 5% du bruit normal sur la mesure de a et b influent peu sur la trajectoire du véhicule (voir trajectoire de la position latérale et de l'orientation de la figure 5.11) puisque seule l'orientation du véhicule comporte une légère perturbation.

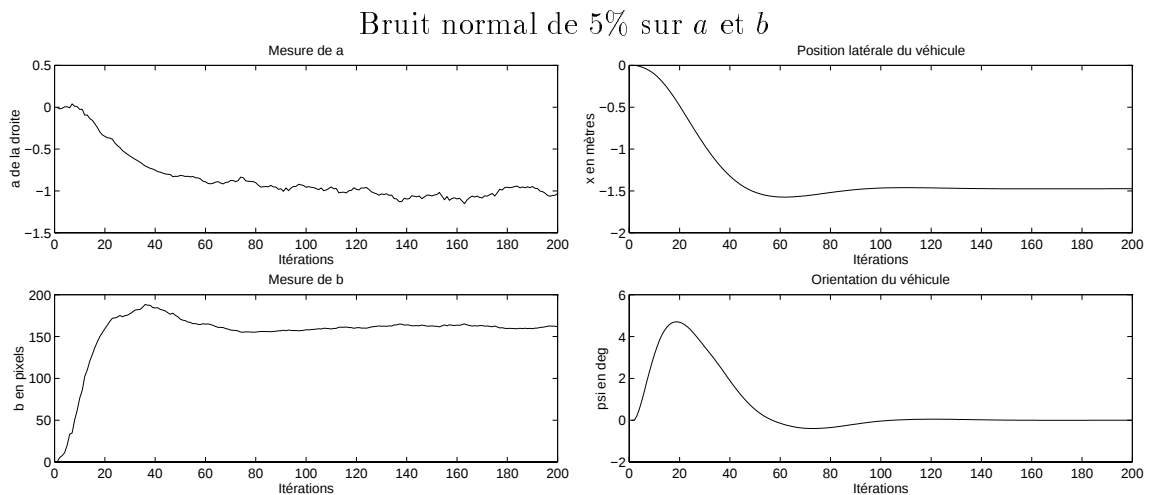
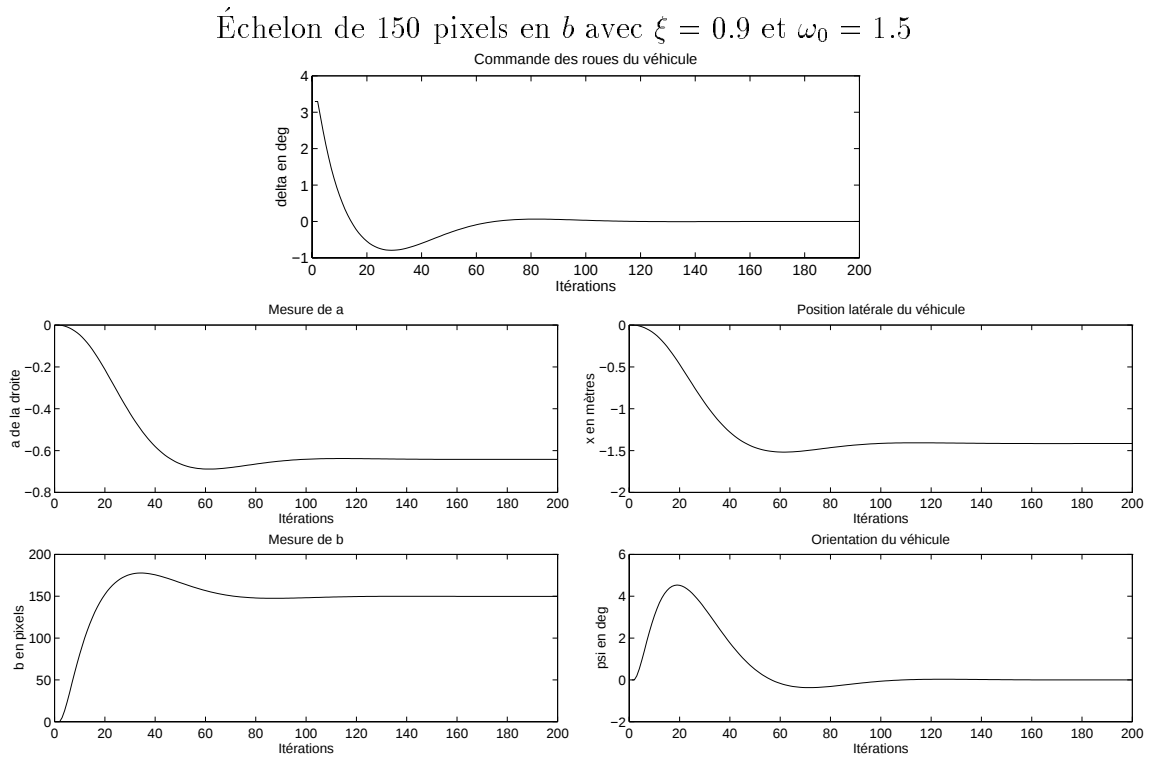


5.3.2 Utilisation du modèle simplifié

Le modèle précédent peut présenter certaines instabilités quant au choix des pôles du système bouclé. De plus, si l'entrée est une commande en vitesse de l'angle des roues, ceci rend le degré du modèle encore plus élevé. Nous réduisons l'ordre du modèle par un changement de variable judicieux. Par ailleurs, on constate que l'on peut passer du modèle dynamique au modèle cinématique en fixant la raideur des pneus à l'infini $C_f = C_r = \infty$.

Un tel modèle converge à son tour et offre ainsi une facilité pour choisir les pôles d'un système du second ordre (voir Figure 5.12). De même la robustesse est assurée au regard du bruit normal de 5% injecté sur les variables des informations visuelles dans la simulation de la figure 5.13.

Nous avons aussi simulé le même modèle mais avec une action en vitesse de l'angle des roues du véhicule. Le résultat est présenté sur la figure 5.14. Le plus grand avantage de cette commande est qu'elle peut supporter un bruit normal de 10% sur la mesure des informations visuelles (voir figure 5.15).



Échelon de 150 pixels en b avec $\xi = 0.9$, $\omega_1 = 10$ et $\omega_0 = 1.5$

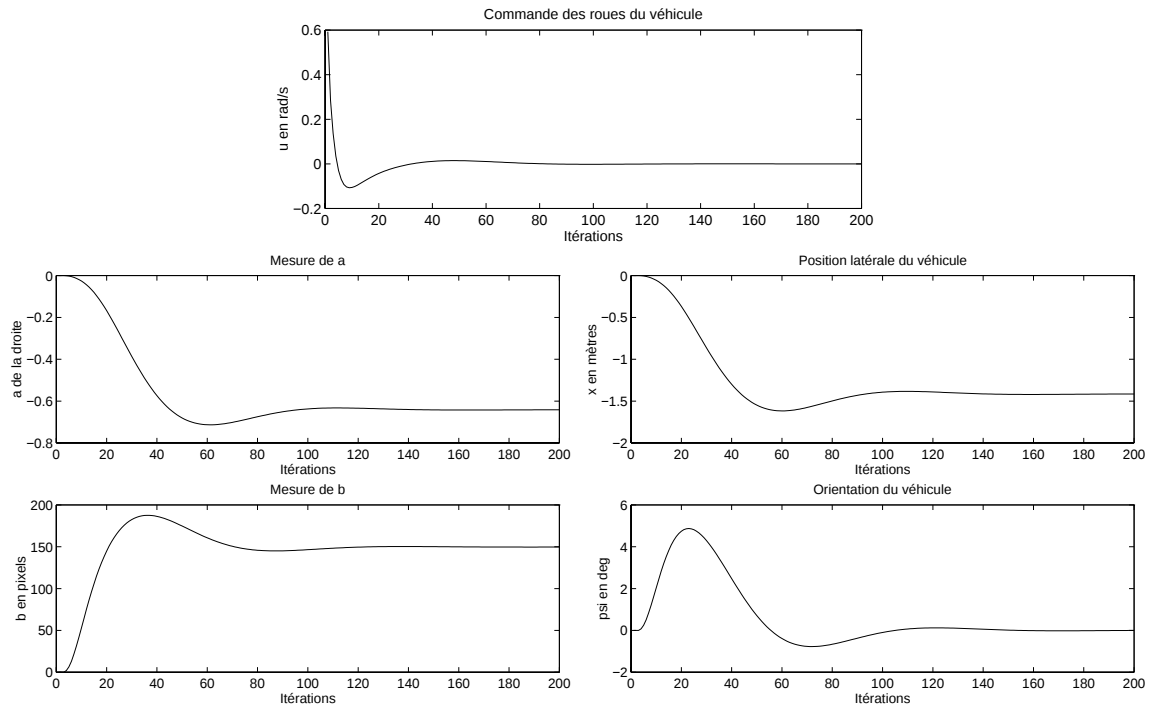


FIGURE 5.14 – *Commande dynamique avec modèle simplifié et commande en $\dot{\delta}$*

Bruit normal de 10% sur a et b

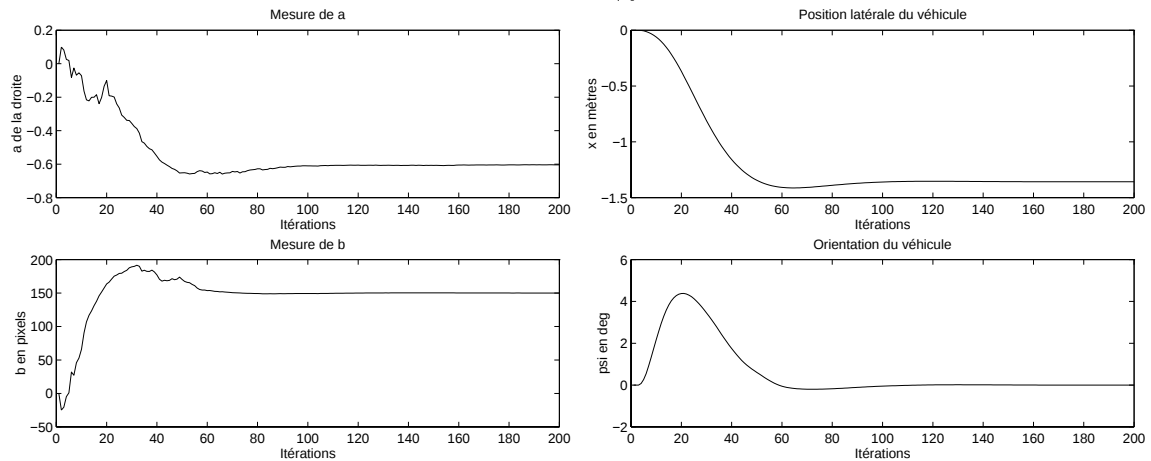


FIGURE 5.15 – *Commande dynamique avec modèle simplifié et commande en $\dot{\delta}$*

5.4 Résultats de la commande H^∞

Dans cette partie, on aborde le problème de robustesse vis-à-vis d'incertitudes concernant les modèles utilisés en pratique (non prise en compte de l'environnement réel du véhicule). Par exemple, on peut envisager des paramètres dynamiques qui varient au cours du mouvement. Nous effectuons divers tests d'asservissement en fonction des variations des paramètres du modèle. La consigne, montrée sur la figure 5.16, a été utilisée afin de simuler la commande dans l'espace d'état par placement de pôles ainsi que la commande H^∞ dans les mêmes conditions sur un changement de trajectoire.

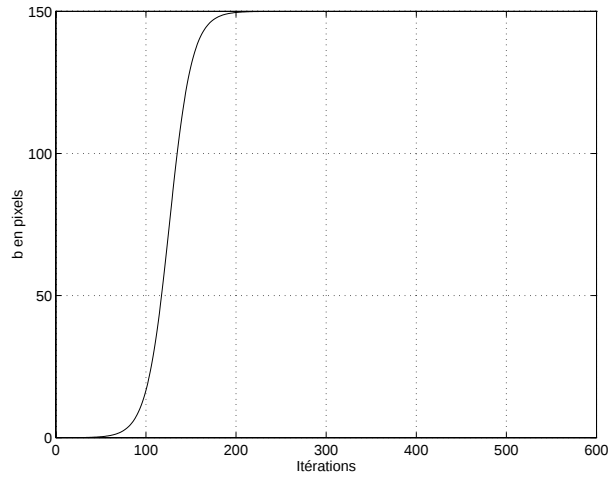


FIGURE 5.16 – *Trajectoire du changement de voie sur un échelon de 150 pixels en b .*

Sur l'exemple de la figure 5.17 nous avons testé la réponse d'une loi de commande cinématique par placement de pôles en faisant varier l'angle d'inclinaison de la caméra $\alpha = [5 : 9]$. On remarque que pour une commande dans l'espace d'état par placement de pôles, la consigne n'est pas atteinte par un correcteur unique lors des variations des paramètres du modèle. Nous pouvons justifier ces erreurs statiques en estimant le calcul de l'erreur statique en boucle fermée dans ce cas précis.

Estimation de l'erreur statique en boucle fermée : Considérons les équations d'état suivantes avec $s = (a, b)^T$:

$$\begin{cases} \dot{\underline{s}} = A\underline{s} + B\delta \\ y = C\underline{s} = [0 \ 1]\underline{s} \end{cases} \quad (5.3)$$

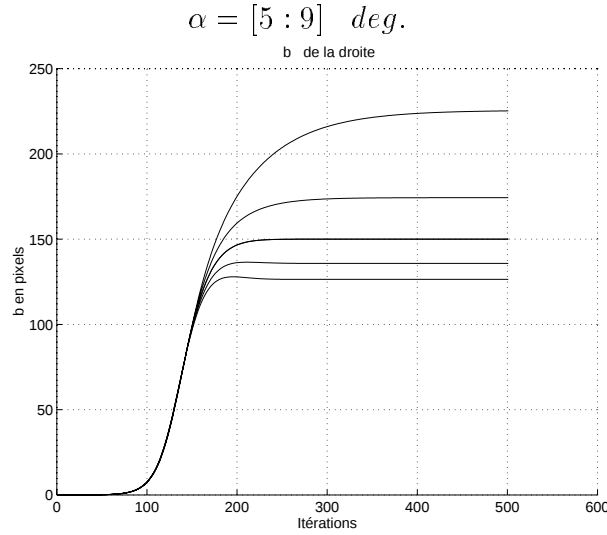
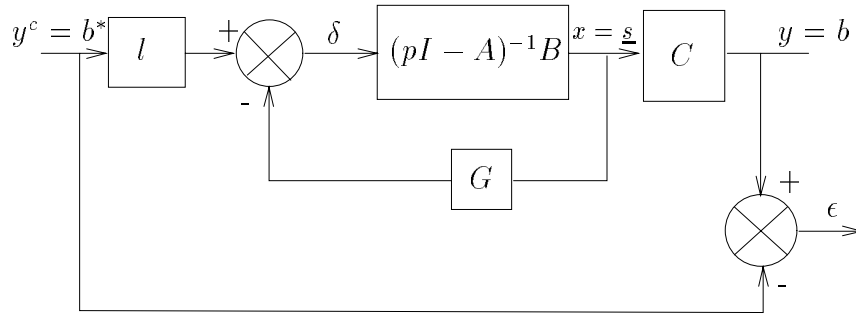
FIGURE 5.17 – Commande cinématique dans l'espace d'état avec variation de α .

FIGURE 5.18 – Erreur statique en boucle fermée.

En tenant compte des perturbations des paramètres du modèle d'état, nous avons :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{V(\xi_2 + \Delta\xi_2)}{\xi_1 + \Delta\xi_1} & -\frac{V\xi_3}{\xi_1 + \Delta\xi_1} \\ \frac{V(\xi_2 + \Delta\xi_2)^2}{(\xi_1 + \Delta\xi_1)\xi_3} & \frac{V(\xi_2 + \Delta\xi_2)}{\xi_1 + \Delta\xi_1} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

La figure 5.18 représente le schéma d'asservissement utilisant la méthode de placement de pôles dans l'espace d'état. Nous pouvons établir l'expression générale de l'erreur statique ϵ_∞ comme mentionné sur la figure 5.18.

Sa transformée de *Laplace* est donnée par :

$$\epsilon(p) = b^*(p) - b(p) \quad (5.5)$$

avec :

$$b(p) = C [pI - (A - BG)]^{-1} B l b^*(p) \quad (5.6)$$

par conséquent on obtient :

$$\epsilon_\infty = \left[1 + C (A - BG)^{-1} B l \right] b_\infty^* \quad (5.7)$$

Après quelques développements et approximations, nous pouvons écrire la relation finale de l'erreur statique comme suit :

$$\epsilon_\infty = \left[1 - \frac{1 + \frac{\Delta \xi_2}{\xi_2}}{1 + \frac{2V\xi_2 \Delta \xi_2}{\omega_0 \xi_1 \xi_2}} \right] b_\infty^* \quad (5.8)$$

Nous pouvons remarquer que l'erreur statique est nulle lorsque l'expression suivante est vérifiée.

$$\frac{\Delta \xi_2}{\xi_2} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \quad (5.9)$$

La solution que nous avons adoptée consiste à utiliser une commande robuste. Pour illustrer les résultats de cette loi de commande en simulation, nous avons effectué les mêmes tests que précédemment sur une famille de modèles pour lesquels les paramètres varient.

La première simulation concerne la robustesse vis-à-vis de l'angle d'inclinaison de la caméra. Sur les figures 5.19, 5.20 et 5.21 on a représenté la réponse à un échelon pour différents correcteurs de la commande H^∞ . Les performances d'une telle commande sont meilleures que la commande par placement de pôles classique puisque la consigne est toujours atteinte lors d'un changement de trajectoire (échelon).

La seconde simulation teste la robustesse de la commande H^∞ vis-à-vis de la variation de la hauteur de la caméra. Les résultats sont présentés sur les figures 5.22, 5.23 et 5.24; ils montrent bien l'avantage que peut avoir ce type de commande par rapport à la commande par placement de pôles. Les paramètres du correcteur qui ont donné une meilleure réponse (moins d'oscillation, meilleur temps de réponse) sont $K = 5$, $\alpha_1 = 8/5$, $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$ au regard des figures 5.23 et 5.20.

Une troisième simulation est réalisée en considérant une famille de modèles avec toutes la plage de variation de h et α . Nous remarquons que la réponse correspondant au changement de voie pour cette famille de modèles varie en fonction du changement du modèle en rapport (voir Figure 5.25). Néanmoins, toutes les réponses sont stables et non oscillantes. La valeur maximum du dépassement est approximativement de 5%. Les performances du système en boucle fermée ainsi présenté peut être modifié en changeant les pôles de $u(p)$ ou alors par variation de K tout en respectant les conditions d'interpolation.

$\alpha = [5 : 9] \text{ deg}, K = 10, \alpha_1 = 4/5, \text{ et } \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$

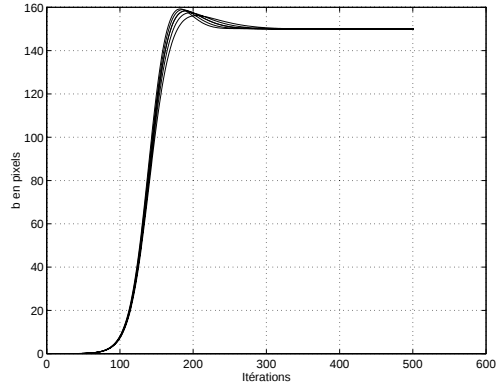


FIGURE 5.19 – *Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α .*

$\alpha = [5 : 9] \text{ deg}, K = 5, \alpha_1 = 8/5, \text{ et } \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$

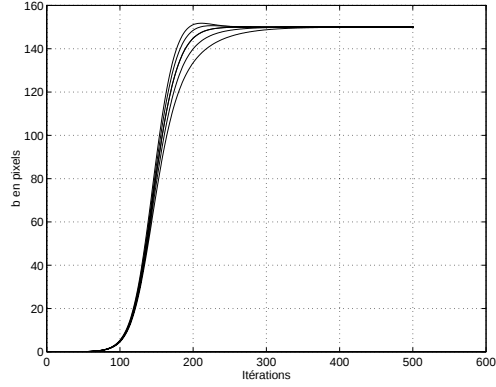


FIGURE 5.20 – *Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α .*

$\alpha = [5 : 9] \text{ deg}, K = 20, \alpha_1 = 0.4, \text{ et } \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$

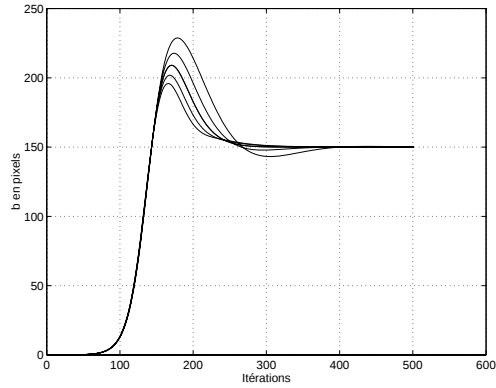


FIGURE 5.21 – *Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α .*

$h = [1.3 : 1.7] \text{ m}$, $K = 10$, $\alpha_1 = 4/5$, et $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$

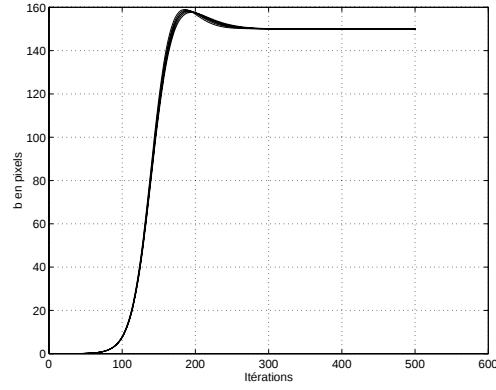


FIGURE 5.22 – *Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de h .*

$h = [1.3 : 1.7] \text{ m}$, $K = 5$, $\alpha_1 = 8/5$, et $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$

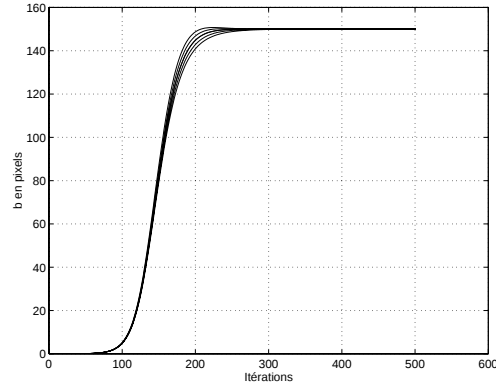


FIGURE 5.23 – *Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de h .*

$h = [1.3 : 1.7] \text{ m}$, $K = 20$, $\alpha_1 = 0.4$, et $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$

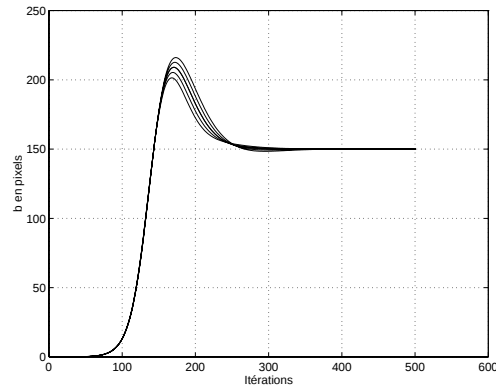


FIGURE 5.24 – *Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de h .*

$$\alpha = [5 : 9] \text{ deg } h = [1.3 : 1.7] \text{ m}, K = 5, \alpha_1 = 8/5, \text{ et } \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$$

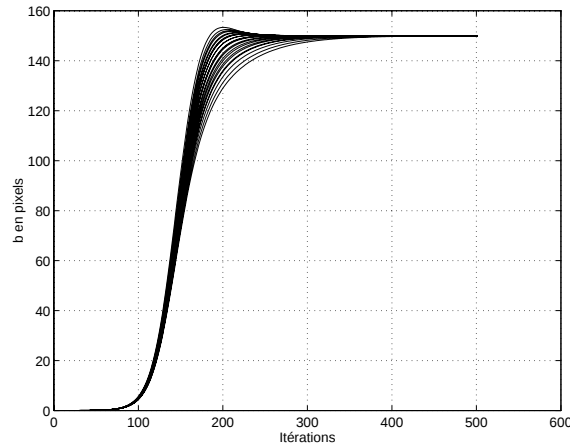


FIGURE 5.25 – *Changement de voie par une commande H^∞ avec variation de α et h .*

5.5 Conclusion

Différentes synthèses de commande dans l'espace d'état ont été proposées. L'analyse des résultats de chaque commande en fonction de divers paramètres (vitesse, temps de réponse, retard ...) nous permet de montrer la qualité des résultats et les limites de l'approche. La critique que l'on peut faire aux commandes par placement de pôles que nous avons testé est qu'elles ne sont pas robustes pour des variations paramétriques du modèle du processus.

L'avantage de l'approche de commande robuste présentée dans ce chapitre est que l'on peut garantir la stabilité grâce à un contrôleur fixe dont l'incertitude est bornée par une fonction de transfert $r(p)$. Les différents essais de simulation ont montré la convergence de nos lois de commande avec des performances suffisantes. Ces tests ont mis en avant l'aspect contrôle latéral d'un véhicule sur trois volets :

- Aspect cinématique : il a été validé sur deux types de robots mobiles (véhicule automobile et engin agricole) utilisant deux types de modélisation de la scène.
- Aspect modélisation de la scène : la validation a été effectuée sur deux plate formes. L'une des modélisations définit l'interaction dans l'espace du capteur. L'autre concerne l'interaction dans l'espace cartésien du robot.
- Aspect dynamique : il a été montré qu'il est possible d'intégrer dans la synthèse de lois de commande référencée vision.

Les difficultés liées à l'approche de commande robuste H^∞ peuvent se résumer par deux faits. Une des difficultés est due à la manière de déterminer la fonction de transfert du système nominal ainsi que les incertitudes qui lui sont liées. L'approche utilisée dans notre cas consiste à choisir le système nominal $F_0(p)$, et ensuite déterminer une borne d'incertitude en fréquence de chaque paramètre susceptible de varier. Ceci limite l'amplitude des variations des paramètres qui assurent l'existence d'une fonction réelle strictement bornée $u(p)$. En d'autres termes, ce fait peut expliquer que le rapport $\frac{r(p)}{F_0(p)}$ peut être supérieur à 1 si la variation des paramètres est grande.

Une autre difficulté relative à cette approche pourrait être liée à la limite des performances attendues. On peut avoir au mieux les pôles de la famille des systèmes en boucle fermée placés à gauche dans l'axe des réels, en prévoyant une garantie de stabilité.

Chapitre 6

Résultats expérimentaux

*A mighty maze! but not without a plan.
Alexander Pope*

Nous abordons dans ce chapitre les différents résultats expérimentaux. Le premier résultat expérimental que nous allons exposer concerne une application liée à la conduite automatique d'un engin agricole mobile. Les expériences ont été effectuées au CEMAGREF sur une moissonneuse-batteuse. Le second résultat expérimental concerne la conduite automatique sur route. Les expériences sont effectuées sur notre site de laboratoire permettant de simuler la conduite automatique sur autoroute à l'échelle $\frac{1}{10}$. Nous décrirons dans les deux cas les architectures matérielles mises en place lors de nos différentes expérimentations.

6.1 Application à la conduite d'un véhicule agricole

Avant d'exposer les résultats obtenus, on va expliquer les particularités du domaine agricole ainsi que le contexte de la conduite de machines agricoles. On peut dire que le guidage d'une machine agricole est plus en rapport avec un véhicule routier à faible vitesse qu'avec un véhicule à grande vitesse sur autoroute.

Le système de guidage doit être particulièrement robuste pour s'adapter à une très grande variété de situations naturelles rencontrées aujourd'hui par l'homme dans les travaux agricoles. En effet, l'extrême variété des perturbations qui peuvent modifier le comportement du véhicule est a priori inconnu; elle rend difficile et délicat le développement et la synthèse de systèmes d'asservissement. Parmi ces perturbations, on peut noter les problèmes d'interaction entre les roues et le sol (glissement, patinage), les inclinaisons et les caractéristiques dynamiques du véhicule. L'apparition et la disparition de ces perturba-

tions ne sont pas prévisibles. Elles évoluent dans le temps et dépendent de la modification des conditions climatiques entre autres.

Aujourd'hui, la conduite de véhicules agricoles mobiles est faite entièrement par un conducteur humain. Le contrôle de la direction exige précision et dextérité, et peut demander une attention toute particulière du conducteur dans des situations complexes. Un contrôle automatique de la vitesse et de la direction permettrait au conducteur humain présent sur le véhicule, d'optimiser l'utilisation de la machine en concentrant son attention sur la tâche agricole.

Le développement d'un système d'aide au guidage dans le domaine agricole peut être conditionné aussi par d'autres critères, tels que le problème de coût et de facilité de mise en œuvre. Les choix technologiques doivent rester par conséquent réalistes pour espérer intéresser les fabricants de machines agricoles ainsi que les utilisateurs. De plus, la dureté du travail agricole rend ce domaine particulièrement exigeant quant aux équipements quelle que soit leur nature. L'objectif du travail est d'asservir le véhicule agricole en position latérale et en orientation par rapport à la limite de fauche afin d'obtenir une largeur optimale de travail.

Dans ce contexte, notre approche a été testée en vraie grandeur pour le guidage automatique des engins agricoles par un système de vision [Khadraoui 95a]. Il s'agit d'une approche modélisante qui utilise :

- le modèle cinématique simplifié d'un véhicule à quatre roues dont les roues arrières sont directrices,
- les données issues d'un traitement d'images correspondant aux primitives d'une droite représentant la ligne fauchée non-fauchée d'un champ agricole par exemple,
- un modèle de commande dans l'espace d'état intégrant les éléments de la matrice d'interaction ainsi que les caractéristiques cinématiques du véhicule.

6.1.1 Organisation matérielle

6.1.1.1 Architecture générale

L'architecture utilisée dans le cadre de cette application est de type *pipeline* composée de deux cartes microprocesseur installées sur un rack VME. L'objectif d'une telle architecture est d'atteindre un temps de traitement de l'ordre de 250 ms. L'étude des détails de parallélisation ainsi que celle de l'implantation temps réel des algorithmes de traitement d'images ont été effectuées par *Mustapha Derras* dans [Derras 93].

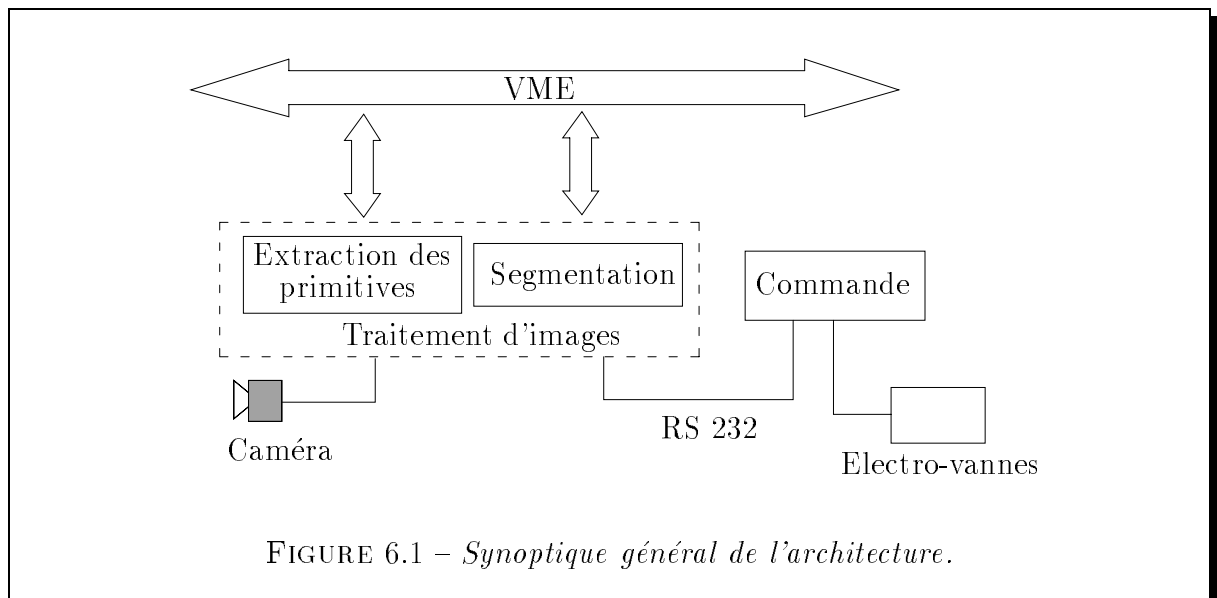
Le synoptique général des différentes composantes mises en jeu est exposé sur la figure 6.1 dont l'organisation est la suivante :

1. Le module d'extraction des primitives : celle-ci est effectuée par une carte IC40 à

base d'un microprocesseur Motorola 68040; elle permet la numérisation de l'image et le calcul des différents attributs de texture et de niveau de gris.

2. Le module de segmentation : elle est réalisée par une carte EUROCOM7 à base de Motorola 68040 également; celle-ci reçoit de la carte IC40 une pseudo-image vectorielle via une zone de mémoire partagée. L'algorithme de segmentation Markovienne définit les différentes régions de l'image en fonction des descripteurs qu'il a reçus.
3. Le module de commande : ce module est constitué d'un PC qui assure le contrôle bas niveau de l'engin ainsi que la commande haut niveau à partir des informations visuelles envoyées par la carte EUROCOM7.

Le principal problème causé par une telle construction en mode pipeline réside dans la répartition et l'organisation de toutes les tâches simultanées qui constituent l'algorithme de parallélisation. Deux tâches seulement ont été déterminées et attribuées à chaque carte microprocesseur. Afin de gérer tous les problèmes rencontrés par les ressources partagées entre différents processeurs, le système d'exploitation OS9 a été choisi. En effet, la connaissance d'une information a priori (segmentation de l'image précédente) ainsi que l'algorithme de parallélisation nous permet d'atteindre l'objectif temps réel puisque le temps de traitement moyen par image est de 270 ms.



6.1.1.2 Module de traitement d'images

L'acquisition de l'image se fait au moyen d'une caméra CCD placée à l'avant et sur le côté gauche de la machine. L'image obtenue comporte principalement deux régions : une zone de végétation fauchée et une zone non-fauchée. Le but de l'algorithme développé au CEMAGREF par *Mustapha Derras* est d'extraire les coordonnées de la primitive symbolisant la limite de la zone fauchée et non-fauchée, modélisée par une droite.

Une analyse de texture a été retenue pour segmenter cette image. L'essentiel de l'information est contenu dans un voisinage de petite dimension : le texel d'une taille de 16×16 pixels. Pour déterminer le choix des paramètres de l'image, *Derras* s'est orienté vers deux méthodes [Derras 93]. La première est basée sur des outils statistiques du premier ordre et plus particulièrement sur l'histogramme des niveaux de gris dont deux paramètres ont été extraits. La deuxième concerne des outils statistiques du second ordre pour laquelle *Haralick* [Haralick 73] propose d'utiliser les matrices de cooccurrences dont nous pouvons déduire 14 paramètres.

Il a été mis en œuvre quatre de ces paramètres pour lesquels il a été mesuré l'efficacité dans le cadre de nos applications [Derras 93] [Debain 95]. Les dix autres coefficients étaient inadaptés à notre modèle. Par ailleurs, il était intéressant de remplacer les coefficients de contraste et d'inertie qui traduisent des effets de variation de niveaux de gris par des critères issus d'histogrammes de régions pour réduire les temps de calcul. Par conséquent, il n'a été utilisé que deux de ces caractéristiques, à savoir le coefficient d'homogénéité qui donne une idée de l'état de surface de la zone étudiée et l'entropie qui reflète une notion d'ordre.

De plus, pour mettre à profit les propriétés de réflectance des surfaces naturelles mises en évidence, *Derras* a défini deux paramètres issus d'histogrammes de régions élémentaires 16×16 [Derras 93]. Tout d'abord la valeur maximale d'histogramme (valeur du mode) qui traduit la nuance de gris prédominante dans le texel, puis le moment d'ordre deux qui rend compte de l'amplitude de cette prédominance.

Pour chaque texel, on obtient donc quatre descripteurs qui permettent d'effectuer une classification des sites de l'image. A partir de l'image vectorielle ainsi obtenue, *Derras* a développé une méthode de segmentation en région. Celle-ci est une méthode non supervisée basée sur les champs de Markov. Pour mettre en œuvre cette méthode de segmentation, il s'est servi de la théorie du «recuit simulé» et plus particulièrement de l'algorithme déterministe ICM (Iterated Conditional Mode).

6.1.1.3 Protocole de tests

Afin de tester notre loi de commande, nous avons réalisé une piste constituée par une ligne blanche peinte sur un terrain plat. La trajectoire choisie est composée d'une courbure, d'une ligne droite et d'un échelon comme le montre la figure 6.2.

Même si le suivi d'une ligne blanche ne représente pas les conditions réelles d'une

tâche agricole, ce choix a été décidé dans l'objectif de pouvoir étudier au mieux nos lois de commande en plaçant le module de perception dans des conditions très favorables. En effet, il est plus difficile de détecter l'interface d'une région fauchée et non-fauchée d'un champ qui est nettement plus bruitée.

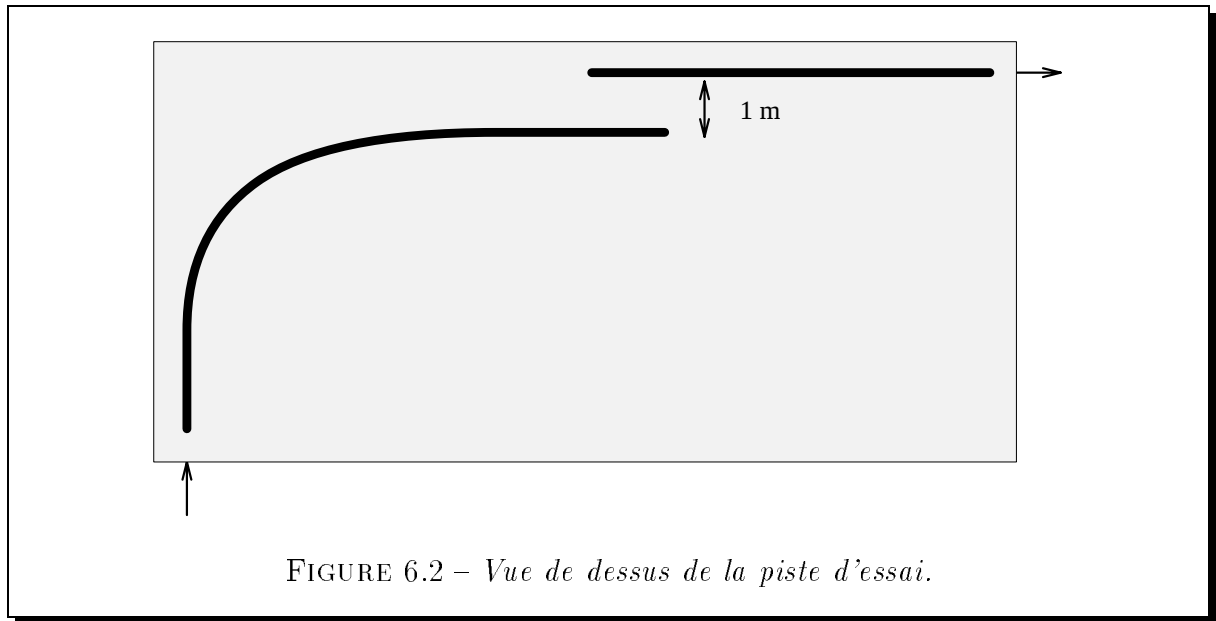


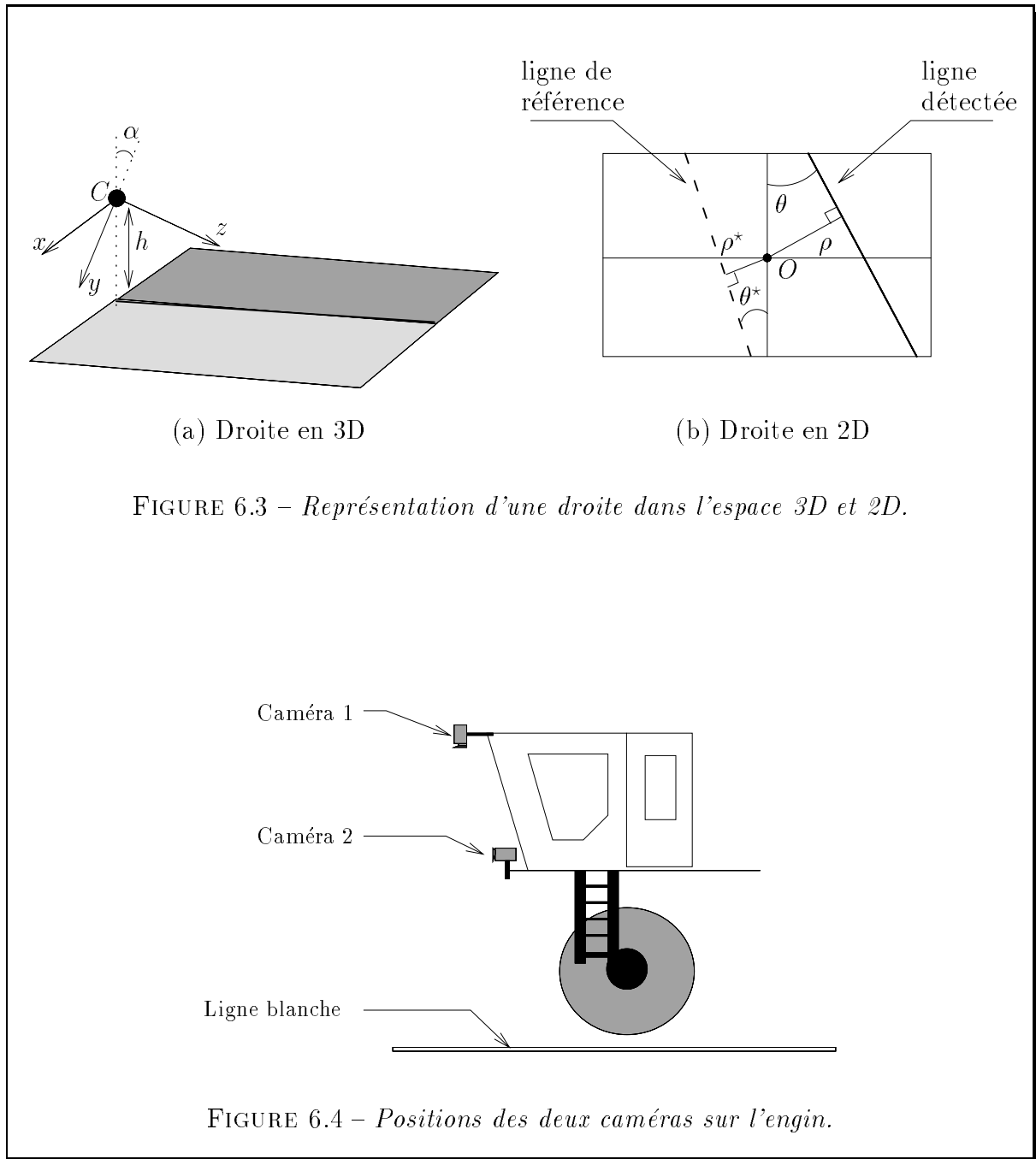
FIGURE 6.2 – *Vue de dessus de la piste d'essai.*

La caméra est placée sur le côté gauche de la cabine de l'engin agricole (caméra 2 de la figure 6.4). Celle-ci est utilisée pour l'acquisition des images de la ligne blanche dont les paramètres sont transmis à l'algorithme de commande par un programme de traitement d'image. Il nous fournit une distance en pixels entre le centre de l'image (droite de référence) et la position de la droite dans l'image (droite détectée). Il nous fournit également l'angle de l'interface par rapport à la verticale de l'image. Ces paramètres sont représentés par les coordonnées polaires (θ, ρ) d'un segment de droite exprimée dans le plan de l'image. La droite de référence représente la situation désirée à atteindre dans l'image de la caméra. Dans ce cas, nous considérons que la moissonneuse est correctement asservie (voir figure 6.3).

Une seconde caméra est placée à proximité de la cabine dont l'axe optique est perpendiculaire au sol comme le montre la figure 6.4 (caméra1). Elle sert de test de qualité du résultat de la commande en effectuant une mesure continue de la distance entre la ligne droite et un point particulier de l'engin. Les images issues de cette caméra sont aussi traitées dans l'esprit de reproduire la trajectoire effectuée par l'engin. L'algorithme de dépouillement des résultats a une précision de l'ordre de ± 5 cm.

Le protocole de test a été fixé afin d'étudier l'influence de différents paramètres sur la commande. Ces paramètres sont la vitesse de roulement de l'engin ainsi que le bruit

introduit sur les mesures. Ce bruit correspond à celui que l'on pourrait rencontrer dans les situations réelles dans le domaine agricole. Il est dû au fait que le terrain ne soit pas parfaitement plat ainsi qu'aux vibrations subies par la caméra dues au fonctionnement de l'engin.



6.1.2 Résultats

L'algorithme d'asservissement à accomplir consiste à :

- suivre le virage,
- réaliser ensuite la réponse à un échelon de 1 mètre,
- suivre finalement la ligne droite.

Différents essais ont été réalisés afin de valider la loi de commande cinématique avec le paramétrage (θ, ρ) mise en œuvre au §4.2.2. Chaque essai met en test la robustesse de la loi de commande vis à vis d'un paramètre bien défini. Nous avons figé pour cela les trois essais suivants :

Essai (1) - Conditions normales

Dans ce cas, les gains de commande sont optimisés pour une vitesse de déplacement longitudinal de 4 km/h.

Essai (2) - Influence de la vitesse

Dans ce cas, l'engin se déplace à 6 km/h, 8 km/h et même à 13 km/h sachant que les paramètres de réglage sont identiques à ceux de l'essai (1).

Essai (3) - Influence du bruit sur les informations visuelles

Il s'agit de superposer sur la mesure de l'erreur latérale un bruit blanc correspondant aux valeurs rencontrées lors du suivi d'une interface naturelle.

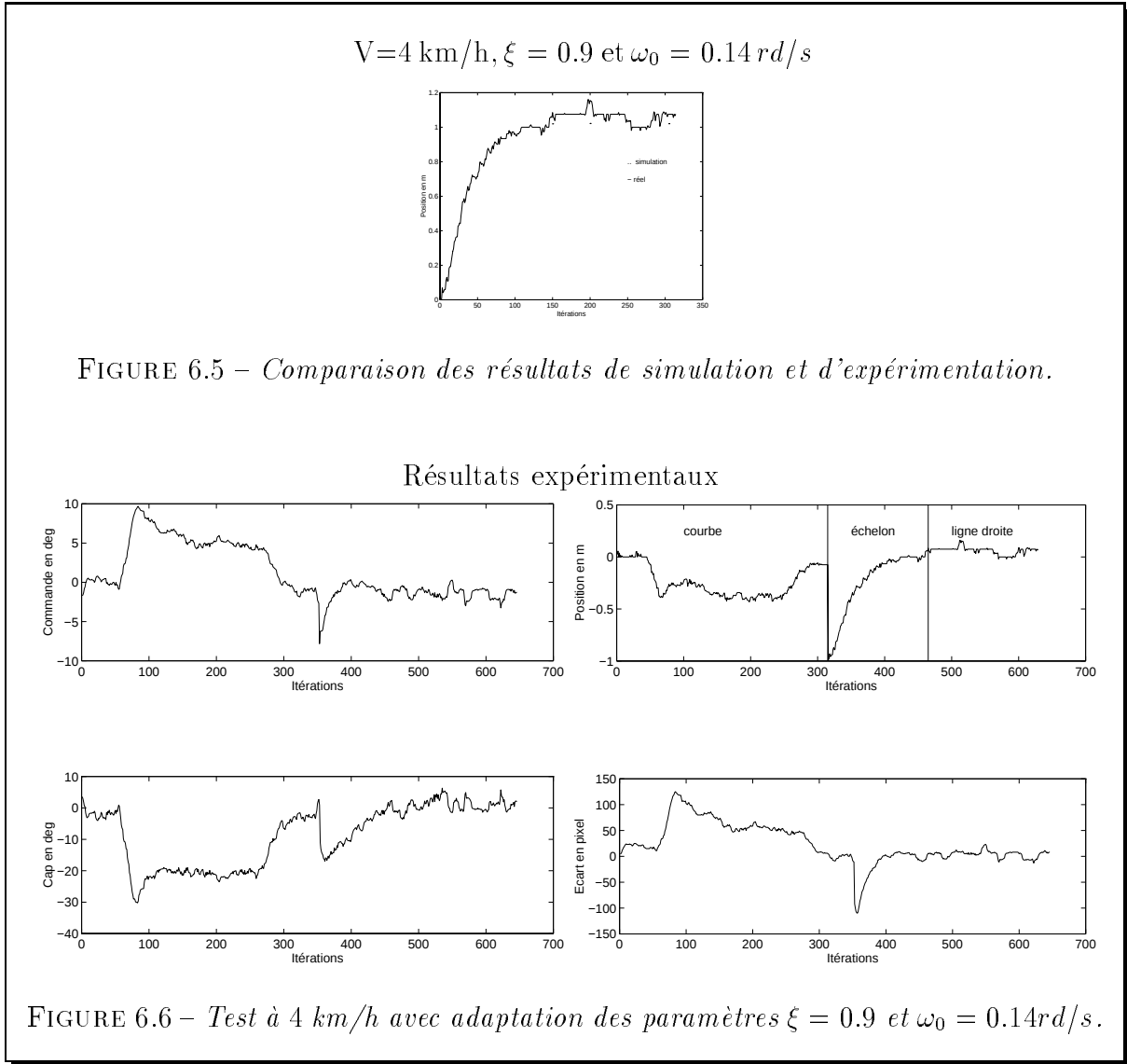
6.1.2.1 Test d'asservissement par la méthode de placement de pôles

Les simulations nous permettent d'ajuster les différents paramètres que nous utilisons pour calculer les gains de la commande (paramètres du système du second ordre : ξ et ω_0 ainsi que la vitesse longitudinale V de l'engin).

Les résultats expérimentaux confirment ceux obtenus en simulation bien que l'on ait considéré que la vitesse linéaire V de l'engin est toujours constante (voir Figure 6.5). Il en est de même pour la période d'échantillonnage T_s due à l'algorithme de traitement d'images. La position latérale a été reconstruite en utilisant les images de la seconde caméra verticale en tenant compte de son étalonnage (cf figure 6.4). Nous constatons que la courbe réelle et la courbe simulée sont superposées.

Sur la figure 6.6 les résultats présentés sont réalisés avec des valeurs adaptées fixées par des simulations afin d'obtenir une bonne réponse à un système du second ordre. Nous avons ajusté les deux paramètres ξ et ω_0 par rapport à la vitesse longitudinale linéaire de l'engin fixée à 4 km/h. Le résultat présenté concerne la position (x, ψ) de l'engin ainsi que l'évolution des erreurs des informations visuelles de la droite mesurées par traitement

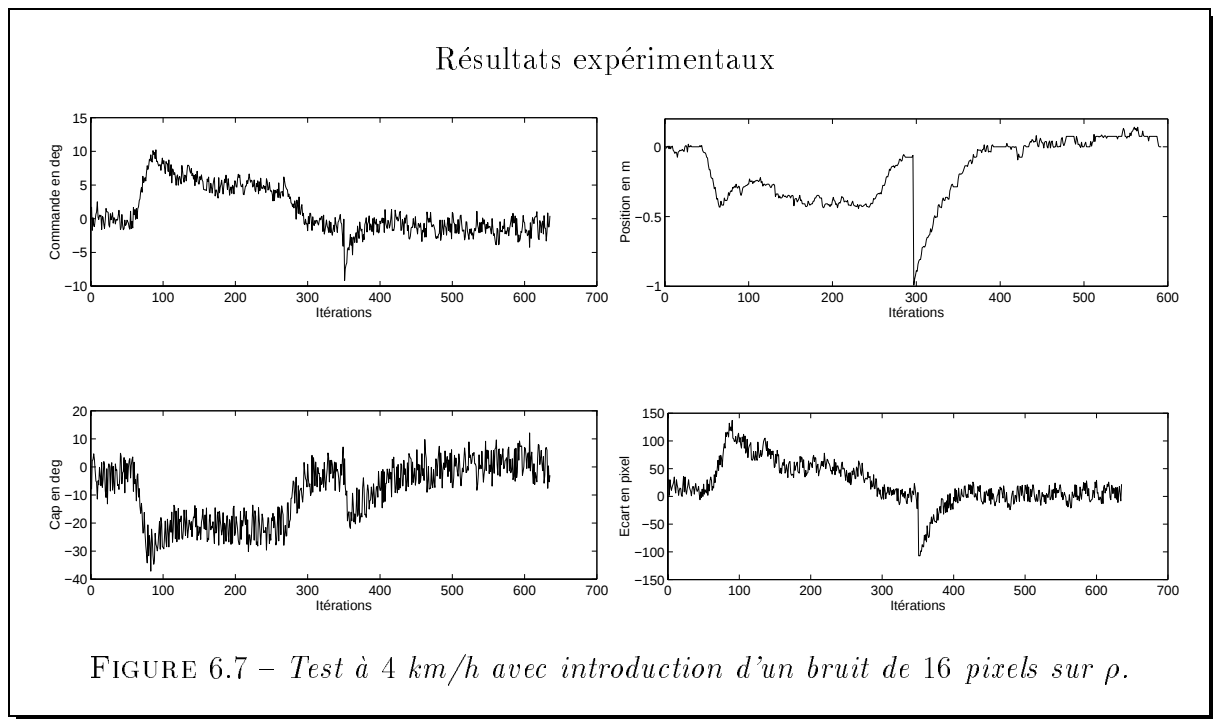
d'images. Les courbes montrent une convergence de l'ordre de 20 s pour la réponse à l'échelon.



6.1.2.2 Robustesse vis-à-vis du bruit de mesure

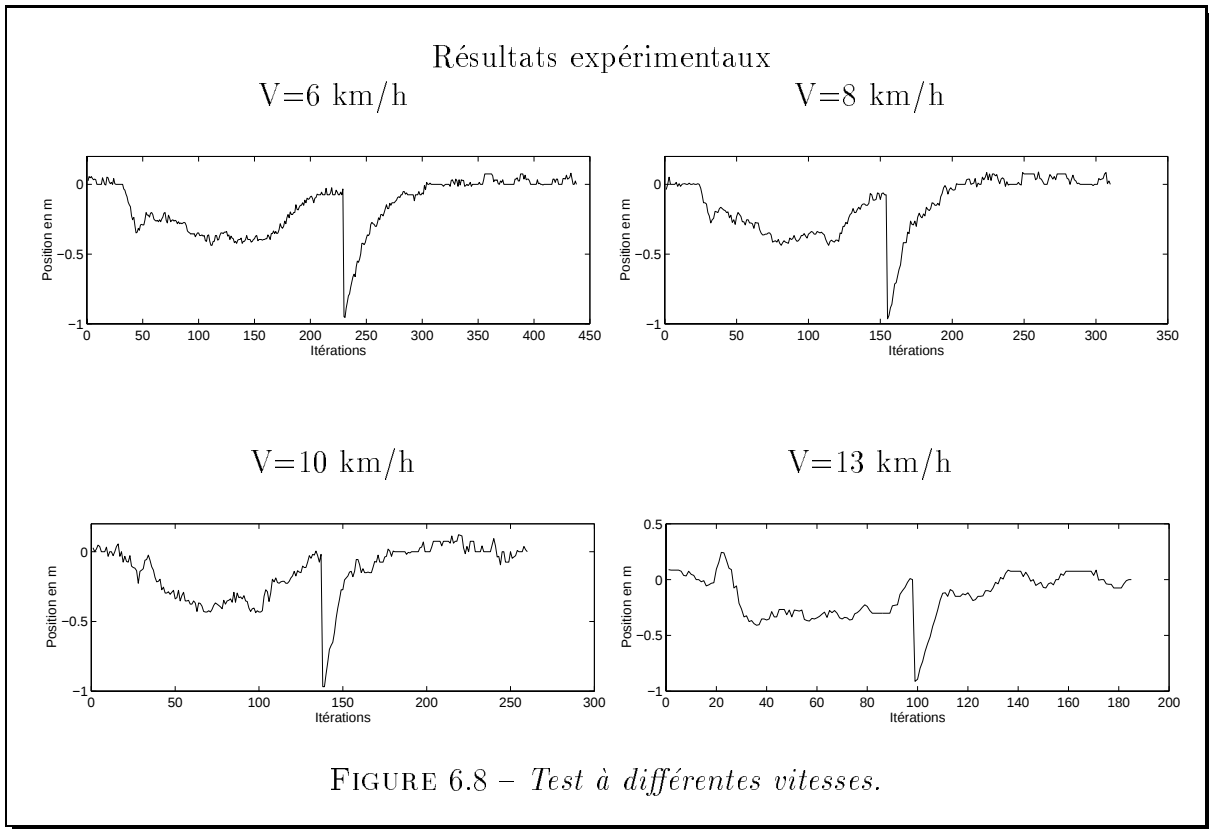
Une machine agricole évoluant dans un milieu agricole est souvent soumise à de nombreuses perturbations du fait que le terrain ne soit pas plat. C'est la raison pour laquelle nous avons réalisé un test de notre algorithme de commande en bruitant nos mesures avec un bruit à moyenne nulle.

Le résultat est présenté sur la figure 6.7 où nous avons testé la robustesse de la loi de commande vis-à-vis de l'introduction d'un bruit sur les paramètres du vecteur mesure $\underline{s}$ en fixant la vitesse d'avancement à 4 km/h. Ce bruit a été estimé lors de plusieurs essais sur des champs. Il représente une variation aléatoire des mesures lorsque l'engin travaille dans les conditions réelles d'opérations de moisson par exemple (± 16 pixels en ρ). Nous remarquons que la tâche d'asservissement est achevée avec une stabilité et une robustesse satisfaisantes. On constate un effet de filtre de l'algorithme au niveau de la position. En effet, le bruit se trouve noyé dans le signal mesuré. Par conséquent, il n'y a pas de répercussions quant au comportement et à l'évolution du véhicule en comparant au cas précédent sans bruit.



6.1.2.3 Robustesse vis-à-vis de la vitesse de déplacement

Nous avons testé d'un autre côté la robustesse de notre approche par rapport à la variation de la vitesse de déplacement longitudinal V de l'engin. La loi de commande est synthétisée pour une vitesse fixe de 4 km/h et l'engin s'est déplacé à différentes vitesses (6, 8, 10 et 13 km/h). La figure 6.8 montre que la machine atteint la ligne et continue à la suivre malgré la non-adaptation des gains à la vitesse dans l'algorithme de commande. Les courbes montrent un bon asservissement sur l'échelon avec une convergence rapide, bien que la vitesse a doublé ou triplé.



6.1.2.4 Analyse et conclusion

Les essais effectués avec la moissonneuse-batteuse ont montré la convergence et la stabilité de la commande référencée vision appliquée au contrôle latéral d'un engin agricole. Cette loi de commande s'est avérée robuste vis-à-vis des variations de la vitesse ainsi qu'au bruit sur la mesure.

Un problème subsiste quant au suivi de courbure. En effet, il y a un décalage entre l'endroit où la machine se trouve et l'endroit où l'image est acquise. C'est une avance dans notre cas entre l'action et l'acquisition. Afin d'intégrer ce décalage dans le programme de commande, deux solutions peuvent être réalisées. La première consisterait à faire une estimation de ce décalage et de l'intégrer au moment de l'implantation de la commande en retardant l'action de la durée estimée en périodes d'échantillonnage. La seconde alternative serait de modéliser l'avance au niveau de la représentation du modèle de commande.

Après avoir décrit nos résultats expérimentaux dans le cas de la conduite automatique d'une machine agricole, nous allons détailler d'autres résultats expérimentaux concernant la conduite automatique sur route.

6.2 Application à la conduite automatique sur route

Les applications liées à la localisation ou à la conduite automatique de véhicules sont très nombreuses et variées. L'un des objectifs est de développer un ensemble de fonctionnalités visant l'amélioration de la sécurité des conducteurs et des passagers de demain. Dans cette optique, une application d'asservissement visuel est d'un grand recours. Un véhicule équipé d'une caméra peut être assimilé à un "robot" particulier dont le nombre de degrés de liberté est limité.

Notre objectif est de réaliser un environnement de laboratoire permettant de tester des lois de commande de véhicules mobiles à une échelle réduite.

6.2.1 Organisation matérielle

6.2.1.1 Synoptique général

Nous avons construit une route à une échelle 1:10 sur un support en bois. A la place du véhicule nous utilisons une petite caméra CCD, portée au bout de l'effecteur d'un robot cartésien associé à un système parallèle de traitement d'images WINDIS permettant d'atteindre le temps réel vidéo ($= 40ms$) pour notre application [Martinet 91] [Rives 93]. La caméra se déplace selon deux mouvements : un en translation et un en rotation, découplés entre eux au niveau de la commande.

Nous fixons la hauteur de la caméra ainsi que son inclinaison, après avoir calculé l'échelle de laboratoire correspondant aux vraies conditions d'expérimentation sur une route. Les commandes de l'orientation et du déplacement latéral de la caméra sont générées à travers le module de commande comme le montre le schéma général de la figure 6.9. Sur ce schéma nous remarquons qu'un module de simulation du véhicule est utilisé afin de générer les deux commandes nécessaires à la commande du robot cartésien. Ce module reçoit comme entrée la commande de l'angle des roues qui dépend directement des informations visuelles $\underline{s}$.

Un robot portique à six degrés de liberté nous a servi de plate-forme expérimentale afin de valider chacune des lois de commande élaborées. Les vitesses maximales admises par le robot sont de l'ordre de 1 m/s pour les axes de translation et de l'ordre de 2 rd/s pour les axes de rotation. Nos algorithmes sont développés en langage C sur station SUN et sont télé-chargés par réseau *Ethernet* sur un châssis VME (voir figure 6.10). L'environnement temps réel utilisé est *VxWorks* de *Wind River Systems*.

Une application d'asservissement met en parallèle un processus de commande et un processus de vision. Le processus de commande est scindé en deux parties. La première, en liaison directe avec le processus de vision, permet de calculer les consignes à appliquer au robot toutes les 40 ms. La seconde, en liaison avec la première par une mémoire partagée, est chargée d'appliquer les consignes vitesses une cadence minimale de 5 ms.

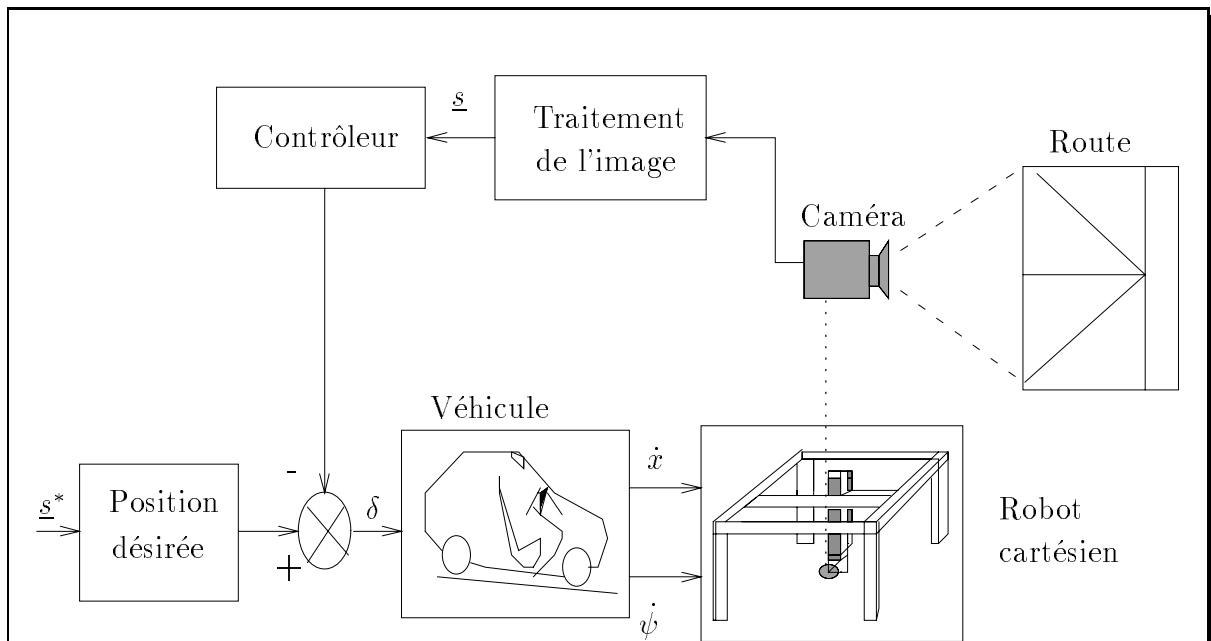


FIGURE 6.9 – Organisation générale de nos expérimentations.

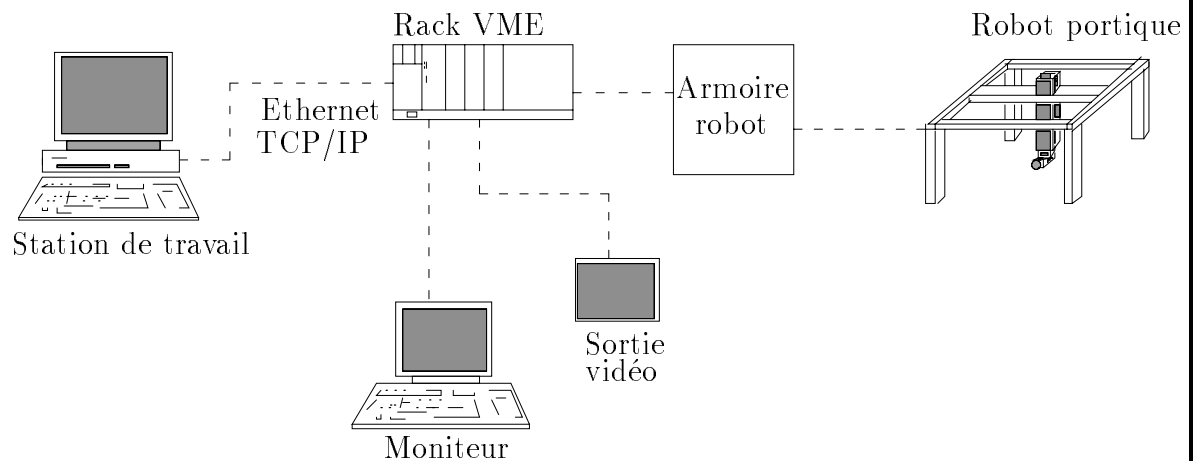


FIGURE 6.10 – Environnement de développement.

Le processus de vision, quant à lui, définit et gère des zones d'intérêts dans l'image afin d'effectuer un suivi visuel des primitives pertinentes. Il fournit au module de commande les informations visuelles nécessaires à une cadence de 40 ms afin d'élaborer la commande.

6.2.1.2 Système de traitement d'images

Le système de traitement d'images est bâti autour de la machine WINDIS, construite autour de trois modules de base dont le synoptique est montré sur la figure 6.11. Elle est composée de :

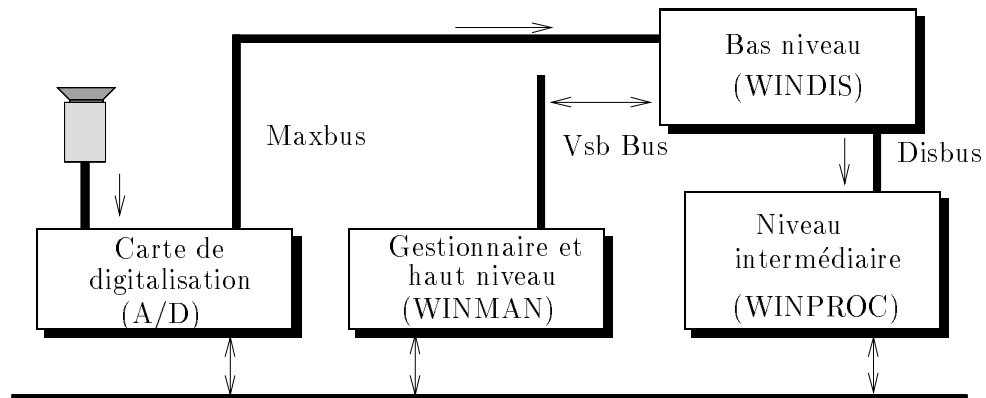
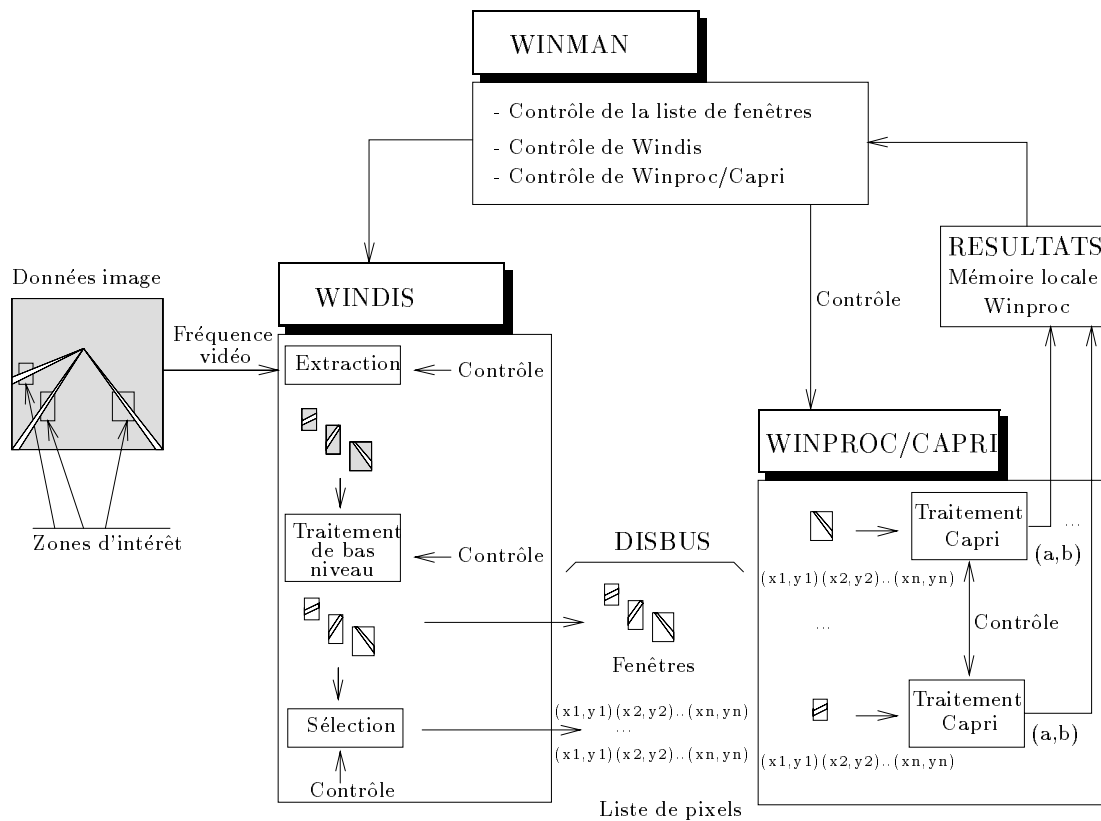
- WINDIS (WINdow DIStributor subsystem) qui est un module utilisé pour l'extraction des fenêtres d'intérêt, l'exécution des calculs bas niveaux et l'établissement de la liste des points candidats à la détection d'une primitive visuelle.
- WINPROC/CAPRI (WINdow PROCessing subsystem) qui est un module utilisé pour le niveau intermédiaire. Son rôle est de paramétrer les primitives visuelles recherchées à l'aide des processeurs DSP 96002 de Motorola.
- WINMAN (WINdow MANager subsystem) qui est un module de contrôle et de gestion des listes de fenêtres d'une part, et des modules WINDIS et WINPROC d'autre part. En effet, c'est le traitement de haut niveau qui, en fonction des résultats du traitement du niveau intermédiaire, calcule la commande et réactualise la localisation des fenêtres («visual tracking»).

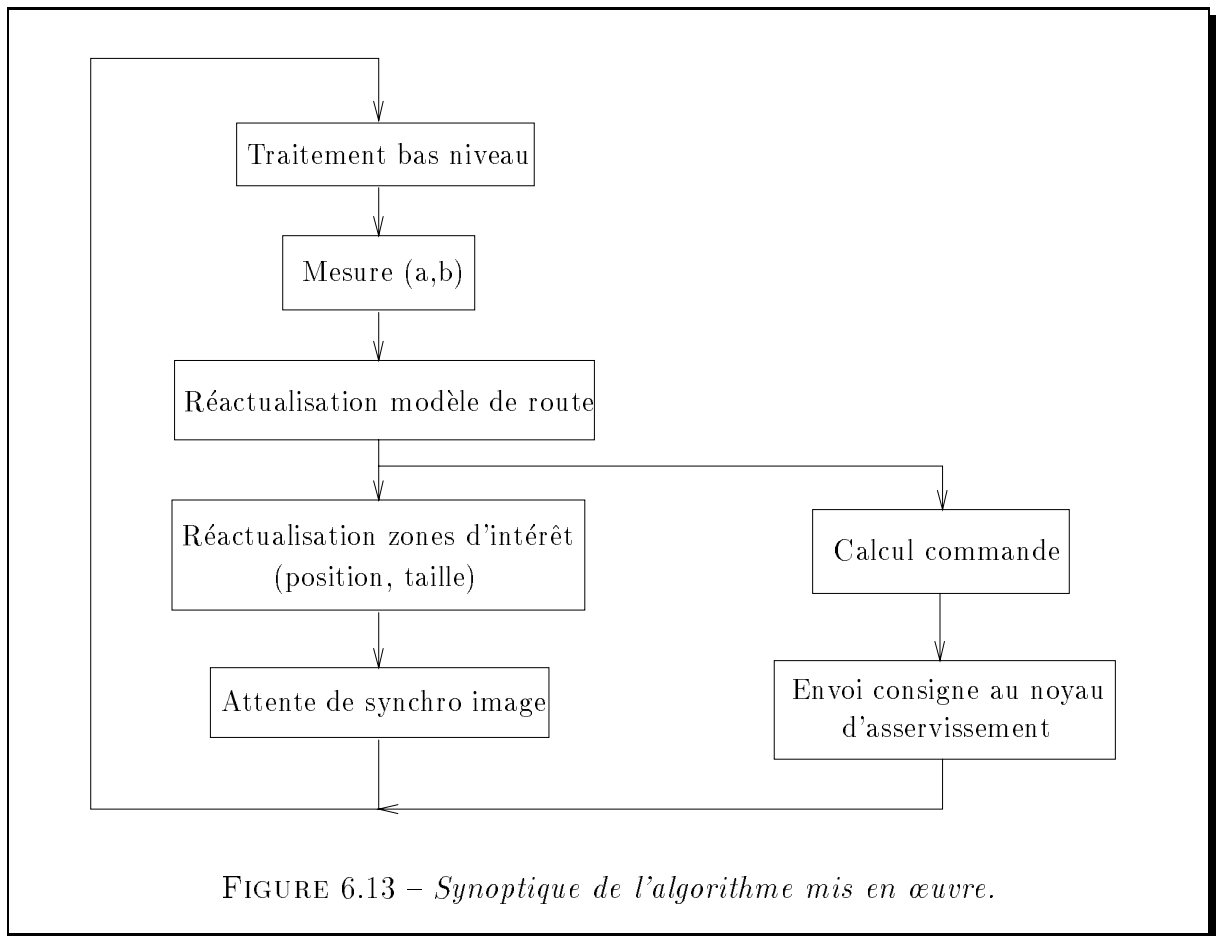
La figure 6.12 montre le module de gestion WINMAN dont les fonctionnalités sont :

- le contrôle du module de gestion des fenêtres WINDIS,
- le contrôle des modules de traitement de niveau intermédiaire WINPROC,
- le suivi des fenêtres actives tout au long d'une séquence d'images.

Au niveau matériel, les fonctionnalités sont implantées sur une unité de contrôle qui est maître des modules WINDIS et WINPROC. Ces fonctionnalités regroupent :

- un algorithme de gestion de la distribution et du traitement à réaliser sur chaque fenêtre,
- le programme d'application dans lequel l'utilisateur définit l'algorithme d'interprétation des primitives géométriques et calcule le suivi des fenêtres dans l'image.

FIGURE 6.11 – *Système de traitement d'images WINDIS.*FIGURE 6.12 – *Flot de données (principe du suivi visuel).*

FIGURE 6.13 – *Synoptique de l'algorithme mis en œuvre.*

Dans le cadre de notre application, nous nous intéressons au suivi visuel d'un modèle de route. La caméra CCD, embarquée sur l'effecteur du robot, transmet l'image de la scène au système de traitement WINDIS. Les informations résultantes sont les paramètres géométriques des motifs extraits de l'image pour la commande du robot. Les primitives visuelles sont les paramètres (a, b) d'une droite matérialisant la ligne blanche d'une autoroute.

La figure 6.13 présente les différentes étapes de l'algorithme mises en œuvre par notre application. On retrouve le traitement bas niveau qui consiste en la convolution des niveaux de gris de la zone d'intérêt par un masque de *Sobel* (X, Y) . Une liste de points candidats est élaborée par seuillage du résultat de la convolution. La mesure des paramètres (a, b) s'effectue par l'application d'une régression linéaire sur la liste des points candidats. À partir des mesures (a, b) on réactualise le modèle. À l'issue de cette étape, on peut effectuer deux tâches : la réactualisation des zones d'intérêt, en taille et en position, ainsi que le calcul et l'envoi de la commande au noyau d'asservissement du robot. Nous allons présenter les résultats obtenus en testant différentes lois de commande sur notre site expérimental.

6.2.1.3 Calibrage du modèle de la route

Nous souhaitons valider le contrôle latéral d'un véhicule automobile dans le cadre de la conduite automatique. Pour cela, nous donnons tout d'abord les éléments permettant de figer les conditions d'expérimentation à l'échelle de laboratoire, ensuite les résultats obtenus.

Il est indispensable de se mettre dans des conditions réalistes du véhicule afin de mieux évaluer les résultats de mise en œuvre des lois de commande sur le plan pratique. Notre solution consiste à étudier la possibilité de disposer d'un environnement de laboratoire afin de tester les lois de commande «in situ» en utilisant un robot cartésien. Il s'agit donc de simuler le comportement d'une voiture par le robot cartésien. Dans cet objectif et pour des applications de contrôle latéral, les translations du robot cartésien sont limitées à celle selon l'axe de déplacement latéral de la caméra et les rotations à celle suivant l'axe perpendiculaire. Ainsi, le robot cartésien se transforme aisément en un robot mobile. L'intégration par logiciel du modèle du véhicule permet de découpler les grandeurs de commande du robot fixe à partir d'une seule action de l'angle volant.

Il reste à choisir les paramètres des conditions d'expérimentation qui sont : la dimension de la route, la hauteur de la caméra et son inclinaison. Ces différents paramètres sont calculés de sorte à respecter l'échelle réduite à $\frac{1}{10}$ par rapport au cas réel. La route est symbolisée par trois droites parallèles dessinées sur un support en bois. Afin de calculer les nouveaux paramètres, nous nous sommes basés sur un algorithme de suivi de route développé par *Chapuis* [Chapuis 91]. La technique utilisée est celle de la projection perspective inverse qui autorise la reconstruction tridimensionnelle d'un modèle de route simplifié. L'algorithme permet la localisation du véhicule et la réactualisation d'un paramètre du modèle de route.

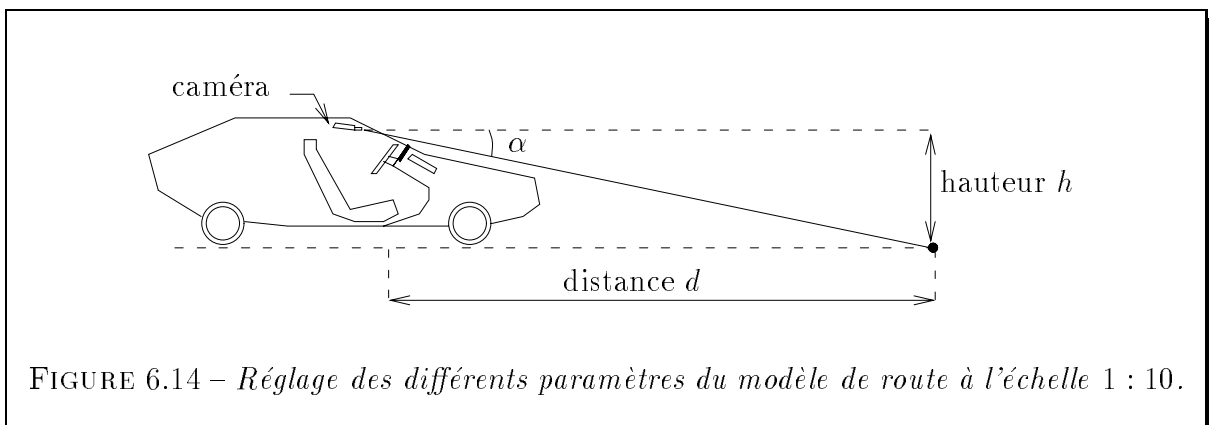


FIGURE 6.14 – Réglage des différents paramètres du modèle de route à l'échelle 1 : 10.

Nous avons implanté cet algorithme sur notre système parallèle de traitement d'images WINDIS. Nous l'avons validé sur la route construite à l'échelle 1/10 en fixant les para-

mètres du modèle de la route, à savoir l'écart entre bandes blanches à 30 cm, la largeur d'une bande à 1.5 cm. La hauteur de la caméra (12 cm) ainsi que son inclinaison (5 deg) sont déterminées par un calcul géométrique par le biais du calcul de la tangente de l'angle α ($\tan \alpha = h/d$) (voir Figure 6.14). L'algorithme est validé dans ces conditions pour plusieurs positions latérales de la caméra. Sur la figure 6.15, nous présentons le résultat sur trois images de la route $\frac{1}{10}$.

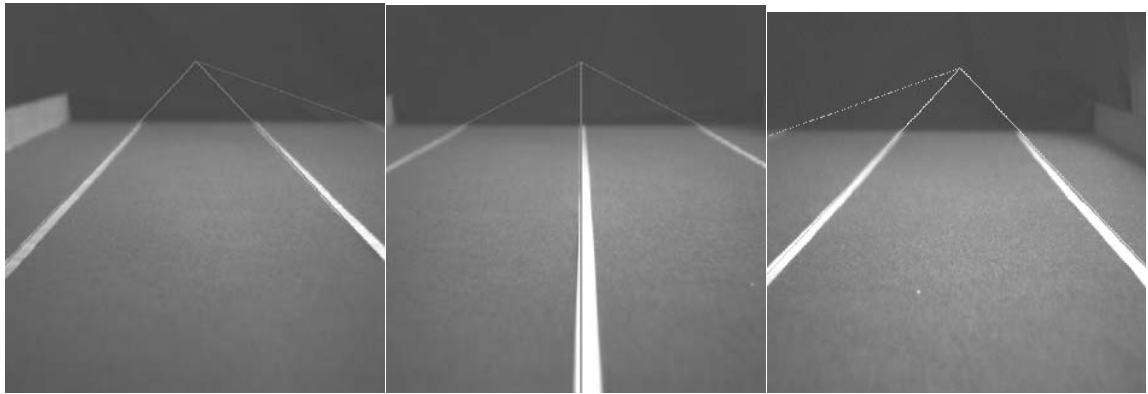


FIGURE 6.15 – Résultats de validation du modèle de route.

L'implantation temps réel de l'algorithme de *Chapuis* intégrant le modèle trois droites à point de fuite a été faite. Pour simplifier la mise au point de la commande, un modèle de route à une seule droite a été utilisé pour les résultats expérimentaux qui suivent.

6.2.2 Résultats

Nous vous proposons maintenant différents résultats obtenus qui concernent les parties suivantes :

- la validation du modèle d'interaction (paramétrage a, b) par identification,
- la validation expérimentale des lois de commande dans l'espace d'état,
- et la mise en œuvre de la commande dans l'espace H^∞ .

6.2.2.1 Identification du modèle

On s'attache ici à prouver expérimentalement la validité de notre modélisation donnée par l'équation (6.1) moyennant quelques approximations que nous justifierons, telle que :

$$\dot{\underline{s}} = L_{\underline{s}}^T T_{x\psi} \quad (6.1)$$

avec :

$$L_{\underline{s}}^T = \begin{pmatrix} \mu_1 & 0 \\ \mu_2 & \mu_3 \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Ce test est réalisé dans le but d'identifier le retard introduit par le système (robot et traitement d'image). Il nous permettra aussi d'identifier les éléments de la matrice d'interaction $L_{\underline{s}}^T$ de l'équation (6.1) que nous avons élaborée. L'identification est réalisée sur le robot cartésien de notre site expérimental.

Le principe et les différentes étapes d'une identification sont résumés dans l'annexe B. La procédure se déroule en deux étapes consistant à commander le mouvement latéral et le mouvement de rotation séparément. Ceci est justifié par le fait que le modèle à identifier est linéaire, par conséquent on peut appliquer le théorème de superposition dans le cas des petits signaux autour d'un point d'équilibre.

Nous avons injecté dans les deux cas une Séquence Binaire Pseudo Aléatoire (SBPA) à l'entrée du système $T_{x\psi} = (V_x, \Omega_y)$ représenté par la vitesse de translation latérale $V_x = \dot{x}$ et la vitesse angulaire $\Omega_y = \dot{\psi}$ du robot cartésien. Le signal de la SBPA est représenté sur la figure 6.16.

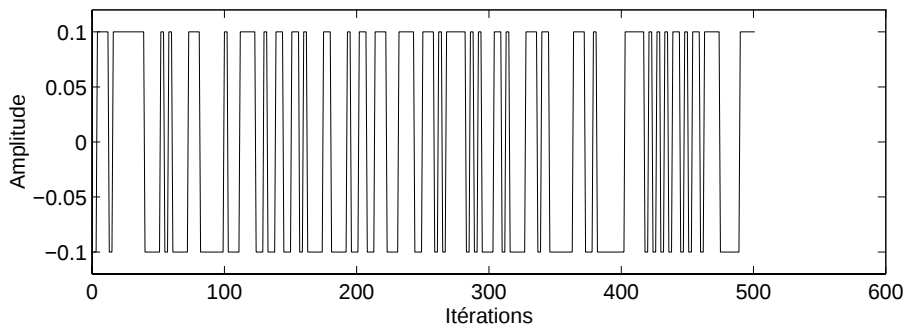


FIGURE 6.16 – La SBPA utilisée pour l'identification.

Nous récupérons en sortie, la mesure du vecteur $\underline{s} = (a, b)$ composé par les informations visuelles de la droite dans l'image.

6.2.2.1.1 Présentation des résultats d'identification : la méthode d'estimation utilise un algorithme des moindres carrés étendus pour déterminer les paramètres du modèle ARMAX de degré 2 et de retard 4. Nous avons choisi un ordre de 2 pour notre modèle par soucis de simplicité. En revanche, le retard a été estimé à partir de la réponse impulsionnelle du système (voir figure 6.17 pour le cas de μ_2). Différentes étapes simplificatrices nous permettent d'aboutir au résultat escompté. Notre objectif était d'identifier un gain statique liant le mouvement tridimensionnel de la caméra au mouvement bidimensionnel de la scène. Nous justifierons nos simplifications intermédiaires grâce au graphique du test de blancheur ainsi que des courbes de superposition de la sortie. L'une correspond à celle issue du modèle et l'autre à celle mesurée directement par traitement d'images.

Nous allons détailler et justifier les différentes étapes de simplification lors de la procédure d'identification pour le cas de μ_2 , valable aussi pour les cas de μ_1 et μ_3 (voir les résultats dans l'annexe C).

Dans le cas de μ_2 , nous représentons le test de blancheur ainsi que la superposition de la courbe de la valeur de b en pixel issue directement de la mesure avec la courbe issue du modèle utilisé dans l'identification. Dans chaque cas, nous présentons la fonction de transfert en continu, donnée sous *Matlab*.

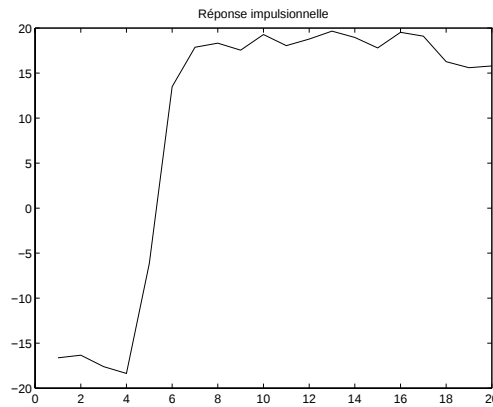


FIGURE 6.17 – Estimation du retard à partir de la réponse impulsionnelle - cas de μ_2 .

La figure 6.18 montre le résultat d'identification du paramètre μ_2 . Dans ce cas, nous représentons le paramètre b en pixel donné par le module de traitement d'image après action sur l'axe de translation en x d'une vitesse V_x grâce à la SBPA. Sur le test de blancheur sont représentés les deux paramètres $RN(0)$ et $RN(i)$. Si $RN(0) = 1$ et $|RN(i)| \leq 0.15$, alors ceci correspond à une situation réelle où l'erreur ε contient des erreurs résiduelles de structure. En effet, on cherche toujours à identifier avec des modèles simples ayant peu de paramètres.

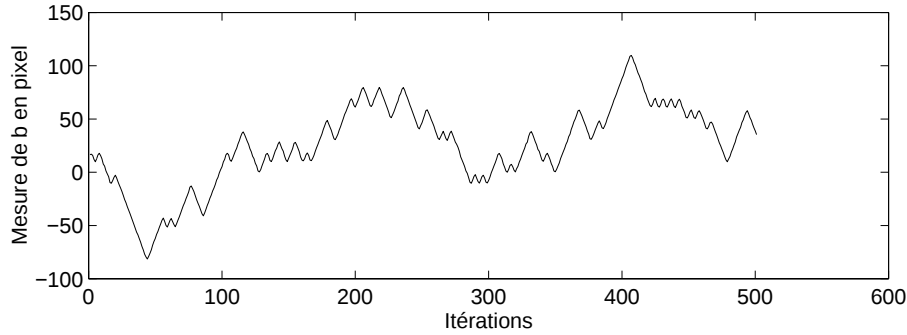


FIGURE 6.18 – Identification de μ_2 - Commande de l'axe de translation en x du robot par la SBPA et mesure de b en pixel.

Nous allons maintenant développer les différentes étapes simplificatrices du test de validité de la procédure d'identification.

Modèle sans simplification : la fonction de transfert identifiée dans ce cas est de la forme :

$$G_2(p) = \frac{b}{V_x} = e^{-3pT_s} \frac{-543p + 39610}{p^2 + 46.4p + 0.002} \quad (6.3)$$

La figure 6.19 montre bien la correspondance quasi-parfaite de l'identification à travers le test de blanchissement où $RN(0) = 0$ et $|RN(i)| \leq 0.15$. Le zoom de la superposition de la sortie mesurée avec la sortie du modèle nous signifie la bonne qualité du résultat. Néanmoins nous souhaitons le simplifier en faisant la première approximation qui suit.

Première simplification : dans un premier temps nous ne retenons de la fonction de transfert donnée en (6.3) que les termes prépondérants. On obtient le modèle simplifié suivant :

$$G_2(p) = e^{-3pT_s} \frac{853.7}{0.02155p^2 + p} \quad (6.4)$$

A partir de ce modèle simplifié, nous avons reconstruit une sortie simulée que nous avons comparé à la sortie mesurée (voir Figure 6.20). Bien que la superposition des deux courbes ne soit pas parfaite, néanmoins le test de blancheur est correct. Le modèle recherché étant celui donné par l'équation 6.2, ceci impose une seconde simplification s'impose.

Seconde simplification : la seconde simplification consiste à voir l'influence de négliger la constante de temps du modèle précédent donné par 6.4. La fonction de transfert devient alors :

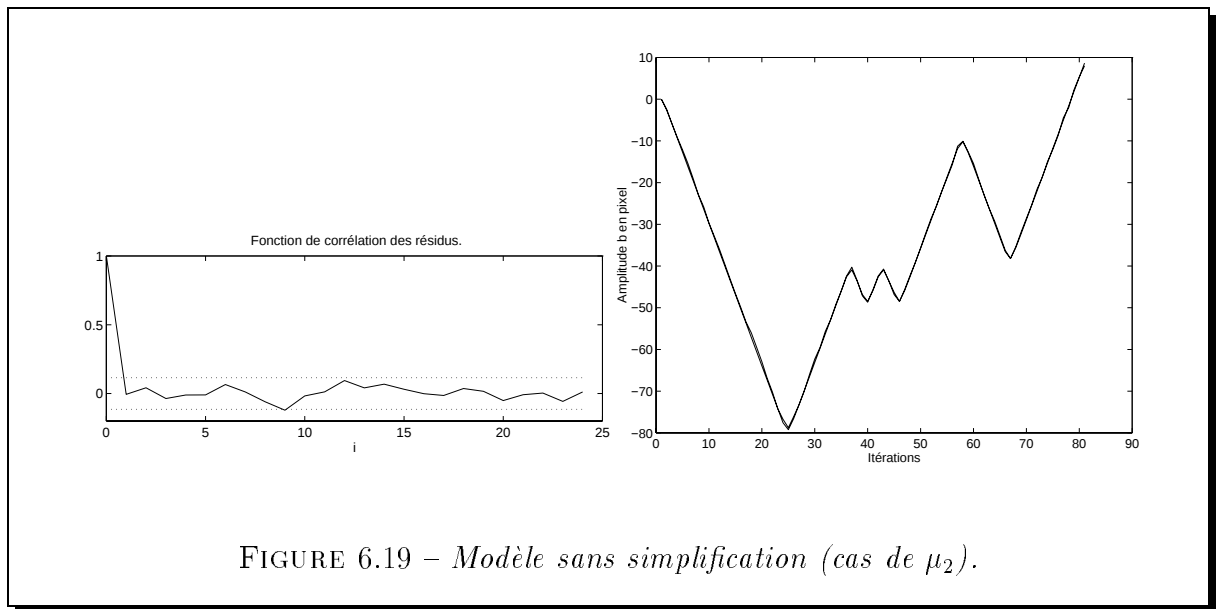
$$G_2(p) = e^{-3pT_s} \frac{853.7}{p} \quad (6.5)$$

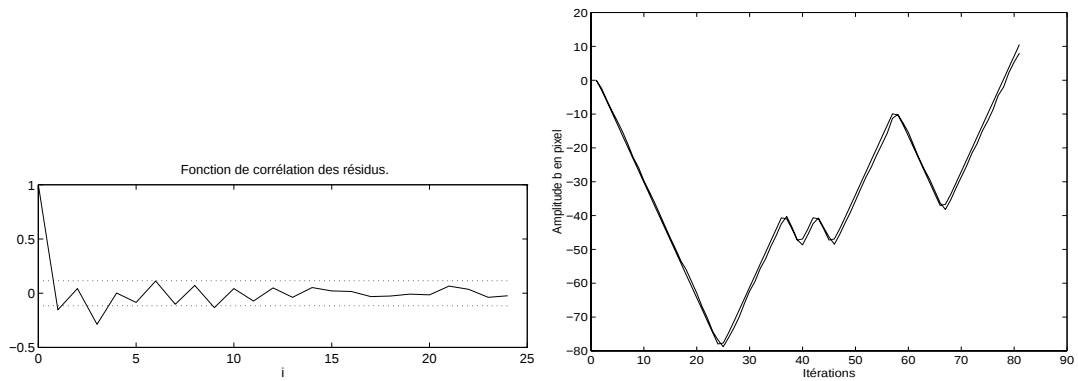
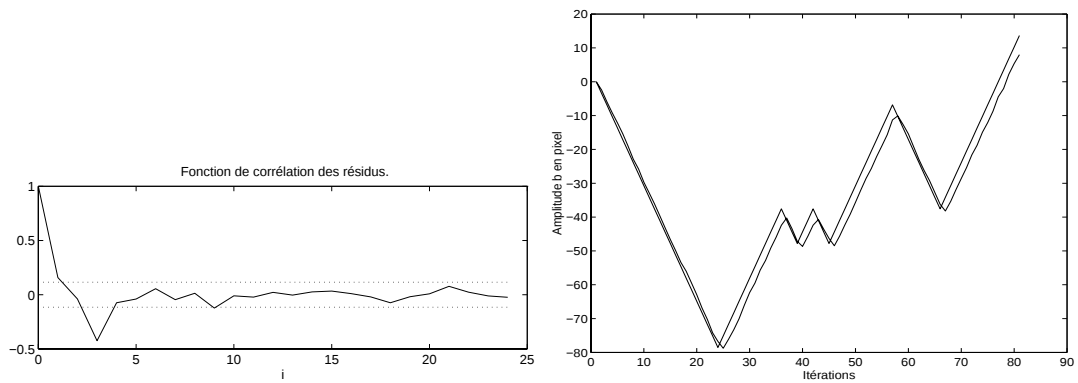
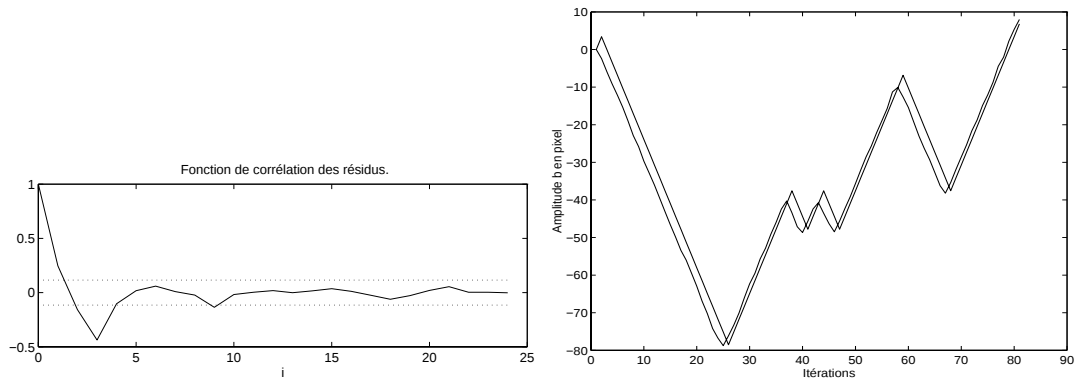
Même si le test de blancheur est correct, en revanche, la courbe de grossissement des sorties simulée et expérimentée ne sont pas parfaites (voir Figure 6.21). En effet, la sortie réelle est décalée par rapport à la sortie simulée. On peut considérer que ce décalage est dû au temps de montée de 0.021 ms que nous avons négligé. Dans la prochaine étape, nous allons l'assimiler à une période d'échantillonnage supplémentaire et voir le résultat.

Seconde simplification avec retard supplémentaire : La fonction de transfert en question devient exprimée par :

$$G_2(p) = e^{-4pT_s} \frac{853.7}{p} \quad (6.6)$$

La même conclusion que dans les résultats précédents peut être tirée dans cet essai puisque les deux courbes sont un peu décalées mais dans le sens opposé (voir Figure 6.22). Ceci peut s'expliquer du fait que la constante de temps est équivalente à la moitié de la fréquence d'échantillonnage.



FIGURE 6.20 – Première simplification (cas de μ_2).FIGURE 6.21 – Seconde simplification (cas de μ_2).FIGURE 6.22 – Seconde simplification avec retard (cas de μ_2).

Paramètre	Signification	Valeur
V	Vitesse du véhicule	20 km/h
L	Longueur du véhicule	0.3 m
α	Inclinaison de la caméra	-15°
T_s	Période d'échantillonnage	40 ms
h	Hauteur de la caméra	0.4 m
f_x	Focale en x	1300 pixel
f_y	Focale en y	1911 pixel

TABLEAU 6.1 – Valeurs des différents paramètres utilisés dans la modélisation.

Paramètre	Identification	Théorique
μ_1	1.72	1.70
μ_2	-853.7	-850
μ_3	1419	1300

TABLEAU 6.2 – Comparaison entre les valeurs théoriques et identifiées de μ_i .

Paramètre	Identification
τ_1 (s)	0.026
τ_2 (s)	0.021
τ_3 (s)	0.031

TABLEAU 6.3 – Identification des différentes constantes de temps τ_i .

6.2.2.1.2 Analyse et conclusion : les tableaux 6.2 et 6.3 résument les valeurs numériques issues des résultats d'identification. Ils montrent les paramètres μ_i identifiés expérimentalement et ceux utilisés en théorie pour la synthèse de la loi de commande sont sensiblement du même ordre de grandeur (voir la table 6.1).

Afin de justifier la fiabilité de notre identification nous avons pu représenter les différents résultats d'exploitation pour chaque simplification faite. L'étape d'identification nous a aussi permis de trouver la constante de temps dans chaque cas testé auparavant. Nous avons trouvé : $20 \text{ ms} < \tau_i < 40 \text{ ms}$ (voir la table 6.3).

Le retard identifié dans les trois cas traités précédemment est compris entre $3T_s$ et $4T_s$ ($3T_s < \tau_d < 4T_s \text{ ms}$). Nous pouvons donc, d'après les différentes étapes d'analyse, considérer la constante de temps égale à une période d'échantillonnage $\tau_i = T_s = 40 \text{ ms}$.

Finalement, la valeur estimée du retard global peut être fixée entre $3T_s$ et $4T_s$. Ces valeurs ont été prouvées et justifiées dans les résultats d'asservissement où nous avons confronté les courbes de simulation à celles obtenues réellement avec le robot (voir § 6.2.2.2).

La procédure d'identification de la matrice d'interaction que nous avons élaboré nous a donc permis de valider ces paramètres compte tenu des approximations faites dans l'élaboration du modèle. Un autre intérêt de l'identification de la matrice d'interaction serait de la réactualiser à chaque itération et d'en tenir compte dans la boucle de commande. Dans notre cas, nous considérons la matrice d'interaction identifiée à l'équilibre.

Ce sont ces valeurs identifiées que nous utilisons pour la mise en œuvre de la commande que nous allons aborder dans la parties suivantes. Nous entamons d'abord les résultats de la commande dans l'espace d'état, sans intégrateur ensuite en rajoutant un intégrateur.

6.2.2.2 Commande dans l'espace d'état

6.2.2.2.1 Placement de pôles sans intégrateur : nous présentons dans cette partie des résultats permettant de montrer la faisabilité du contrôle latéral d'un robot mobile grâce à un robot fixe. Nous pouvons considérer une procédure de commande qui consiste à maintenir la droite fixe et centrée dans le plan image (stratégie de suivi de route). Une autre possibilité consiste à faire une réponse à un échelon dans l'image qui correspond en réel à un changement de voie par exemple. La simulation avec le robot fixe consiste à commander les deux degrés de mobilité relatifs au mouvement latéral ainsi qu'à la rotation, car seul la commande latérale nous intéresse dans cette étude. La structure générale de la chaîne de commande est présentée dans le synoptique de la figure 6.23.

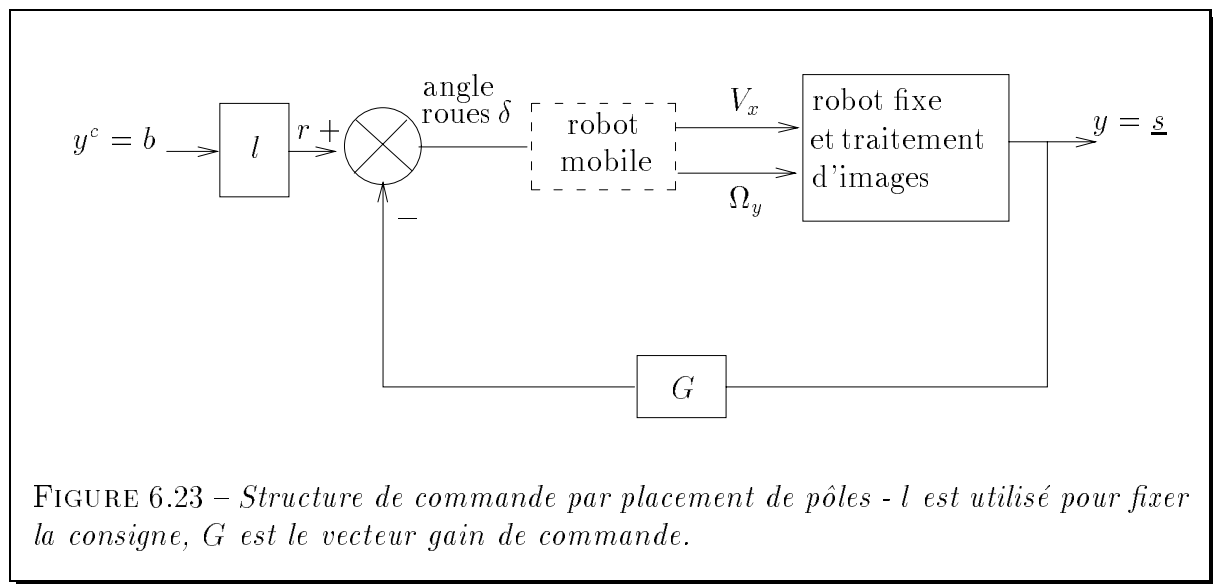


FIGURE 6.23 – Structure de commande par placement de pôles - l est utilisé pour fixer la consigne, G est le vecteur gain de commande.

Nous avons donc deux actionneurs à commander en vitesse à partir de la synthèse de la loi de commande relative à celle d'un véhicule. Ce découplage est réalisé au niveau du module de commande en utilisant les équations cinématiques du véhicule.

La stratégie de commande adoptée afin de valider une expérimentation d'asservissement par rapport à une ligne droite est basée sur une technique de placement de pôles. Les coefficients g_i sont exprimés en assimilant le comportement du système à celui d'un système du second ordre défini par le dépassement ξ et sa pulsation ω_0 . Nous exprimons la loi de commande par la relation suivante :

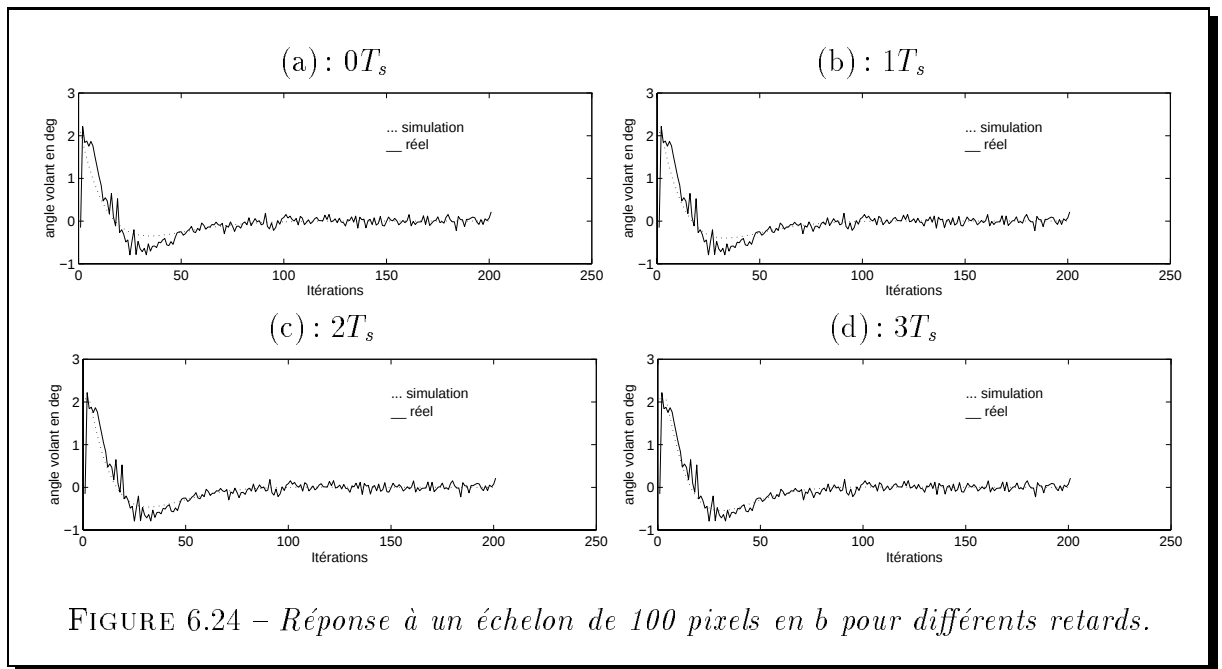
$$\delta = -g_1 a - g_2 b + l b^* \quad (6.7)$$

tels que les gains de commande sont donnés par :

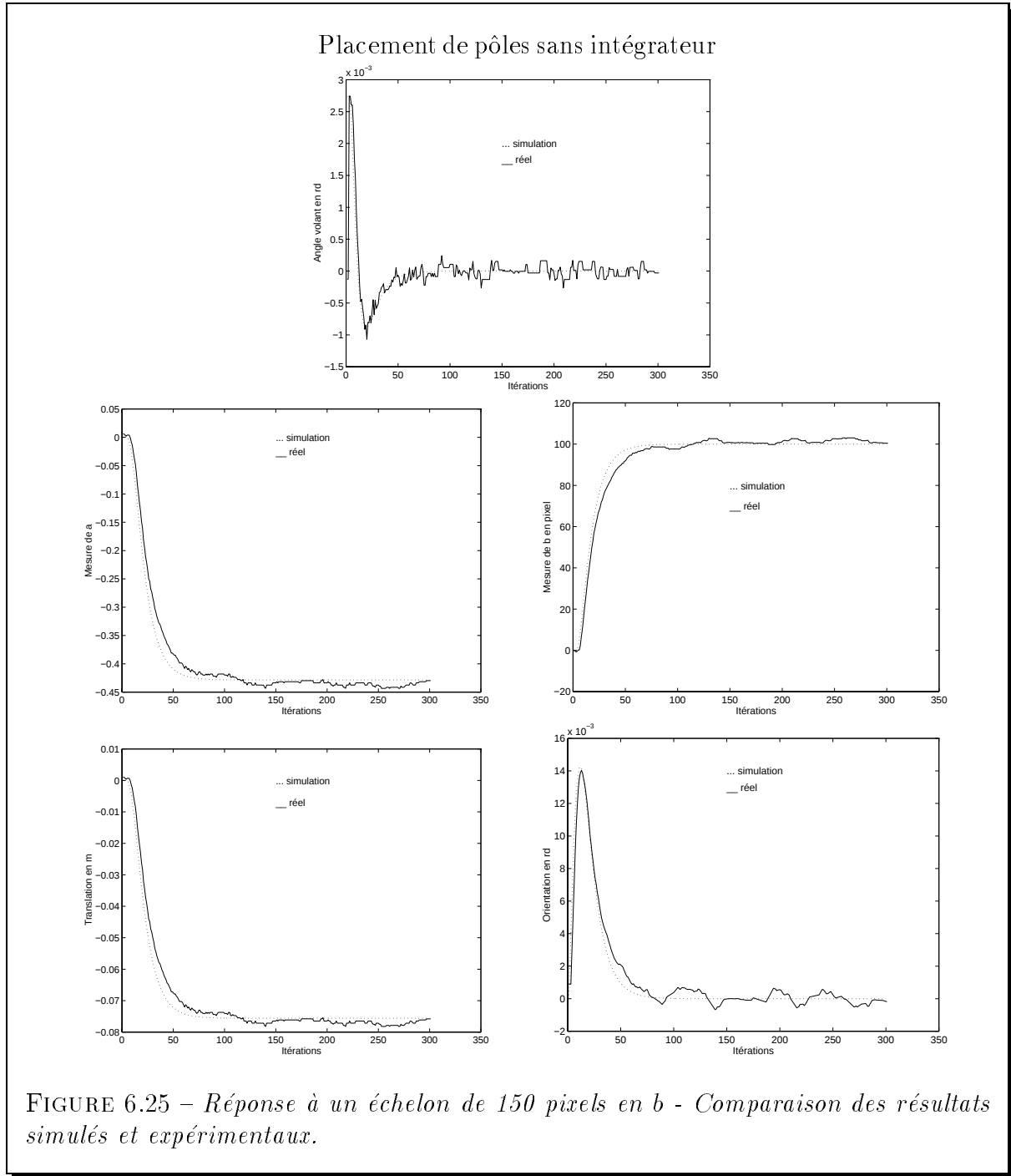
$$\begin{cases} g_1 = L\xi_1\omega_0^2[1 - \frac{2V\xi_2\xi}{\xi_1\omega_0}]/V^2 \\ g_2 = 2\xi\omega_0\xi_3L/V \\ l = \xi_1\omega_0^2L\xi_3/V^2\xi_2 \end{cases} \quad (6.8)$$

Les valeurs du placement de pôles sont optimisées et correspondent aux paramètres suivants du système du second ordre : $\omega_0 = 1.5$ rd/s et $\xi = 1$.

Afin de montrer la validité du retard identifié, nous avons réalisé des simulations pour plusieurs valeurs du retard. La figure 6.24 résume les différents cas de figure. Le retard de 3 périodes d'échantillonnage est celui qui correspond le mieux à notre cas, comme on peut le voir sur les courbes de comparaisons des résultats de simulation et expérimentaux (cf figure 6.25).



En figure 6.25 nous avons le résultat de simulation et d'expérimentation de la réponse à un échelon de 100 pixels en b . La réponse en a suit celle de b à travers le modèle de contrainte liant a et b . Nous remarquons que les courbes de simulation correspondent parfaitement à celles obtenues avec le robot, ce qui prouve la validité de notre modèle.



Nous avons testé en réel la robustesse de notre loi vis-à-vis du tangage. On note que nous avons essayé différentes valeurs de l'angle d'inclinaison dans le modèle tout en gardant un angle constant dans la loi de commande. Nous remarquons que les résultats obtenus pour une réponse à un échelon de 100 pixels en b montrent que la consigne souhaitée n'est pas atteinte et que le système présente une erreur statique avec même des oscillations. La figure 6.26 correspond aux résultats trouvés en réel et confirme la simulation pour des angles d'inclinaison de -7 deg, -8 deg et -9 deg.

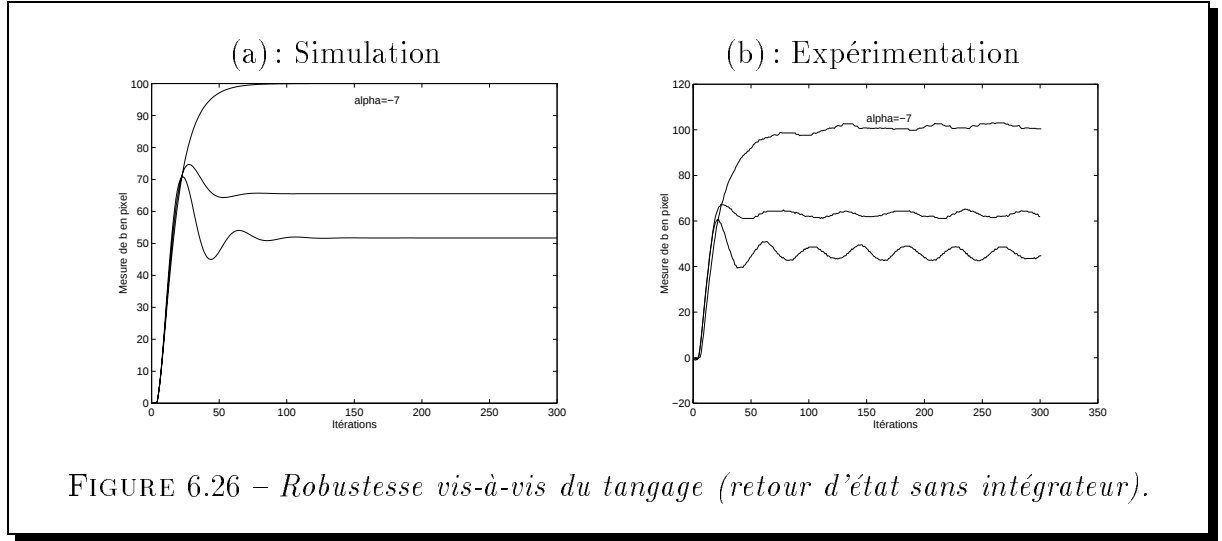


FIGURE 6.26 – Robustesse vis-à-vis du tangage (retour d'état sans intégrateur).

Afin d'éliminer ces erreurs statiques dues aux perturbations de l'angle de tangage, nous considérons, dans la section suivante, la même stratégie de commande dans l'espace d'état mais en rajoutons un intégrateur au système.

6.2.2.2.2 Placement de pôles avec intégrateur : de la même manière que précédemment, nous avons expérimenté sur le robot une loi de commande dans l'espace d'état par placement de pôles avec un intégrateur. La structure de commande d'un système d'état avec intégrateur est montré sur la figure 6.27. Dans ce cas, nous pouvons exprimer la loi de commande par la relation suivante :

$$\delta = -g_1 a - g_2 b - g_i \int (b^* - b) dt \quad (6.9)$$

tels que les coefficients g_1 , g_2 et g_i sont les gains de commande. Ils sont obtenus par identification du système à un comportement du troisième ordre dont l'équation caractéristique

est $(p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2)(p + \xi\omega_0)$. Ainsi, les gains de commande sont exprimés par :

$$\begin{cases} g_1 = -\frac{L\omega_0(2\xi_1\omega_0 V\xi_2\xi^2 - 3\xi_2^2\xi V^2 + \xi_1\omega_0 V\xi_2 - \xi_1^2\omega_0^2\xi)}{V^3\xi_2} \\ g_2 = \frac{3L\xi_3\xi\omega_0}{V} \\ g_i = -\frac{\xi_1 L\xi_3\omega_0^3\xi}{V^2\xi_2} \end{cases} \quad (6.10)$$

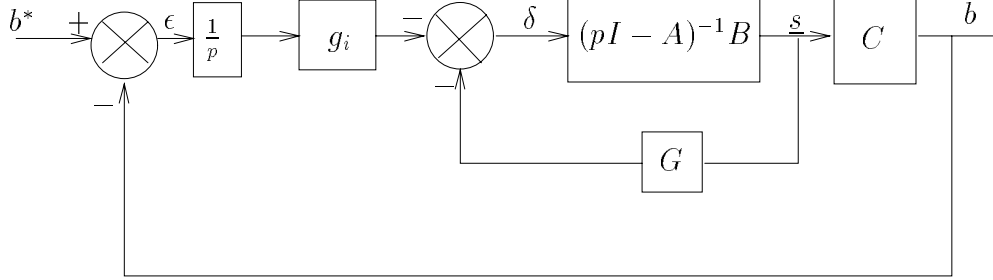


FIGURE 6.27 – Placement de pôles avec intégrateur.

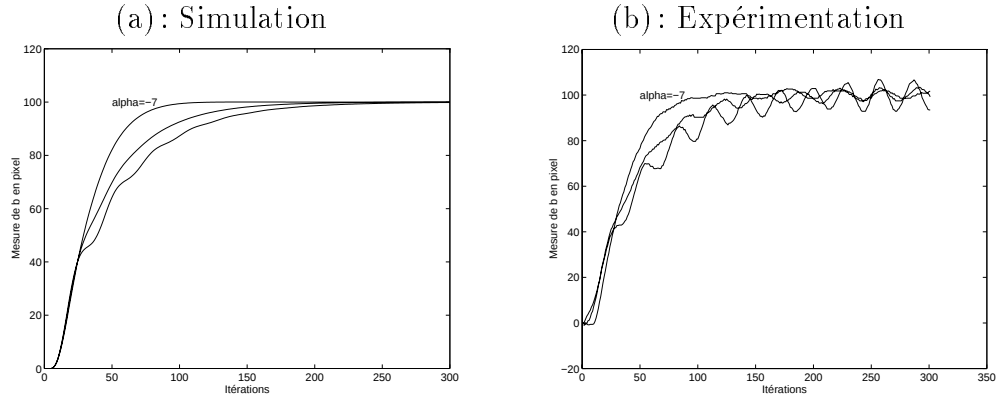


FIGURE 6.28 – Robustesse vis-à-vis du tangage (retour d'état avec intégrateur).

Par ailleurs, la figure 6.28 montre le résultat du test pour les trois valeurs du tangage : -7 deg, -8 deg et -9 deg. On peut conclure, que la convergence est assurée dans le sens où on atteint toujours notre consigne de 100 pixels. Néanmoins, sur la courbe d'expérimentation un comportement oscillatoire est observé pour la valeur du tangage de -9 deg. Nous avons aussi remarqué que le système diverge pour des valeurs de tangage inférieures à -7 deg en valeur absolue.

6.2.2.3 Commande dans l'espace H^∞

La commande robuste H^∞ a été validée dans les mêmes conditions que la loi de commande par placement de pôles [Khadraoui 96a]. Pour synthétiser le contrôleur avec les données des conditions d'expérimentation à l'échelle de laboratoire, une nouvelle analyse de la fonction $r(p)/F_0(p)$ s'impose. Nous avons fixé la plage de variation de l'angle de tangage à 6 degrés. Ainsi, l'évolution du module $|r(p)/F_0(p)|$ en fonction de la fréquence est donnée sur la figure 6.29.

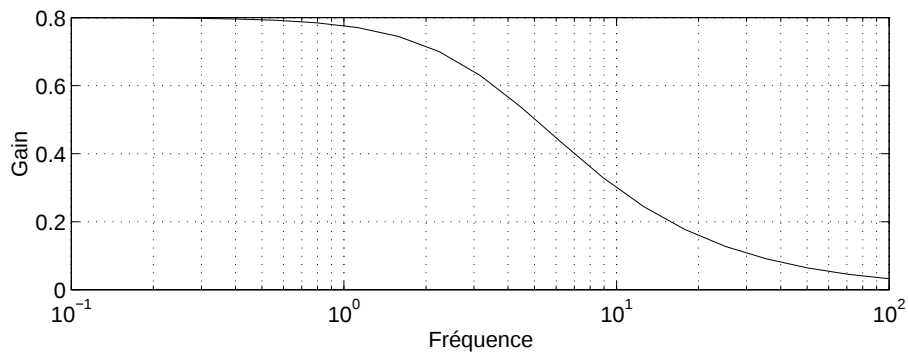


FIGURE 6.29 – Évolution de $|r(p)/F_0(p)|$ en fonction de la fréquence - $\Delta\alpha = 6 \text{ deg}$, $\Delta h = 0 \text{ cm}$.

La valeur limite de l'amplitude est de $k = 0.79$. Ainsi, les conditions d'interpolation s'écrivent d'après l'équation A.56 donnée en annexe A de la manière suivante :

$$u(\alpha_i) = \tilde{q}(\alpha_i)r_m(\alpha_i) = \frac{r_m(\alpha_i)}{\tilde{F}_0(\alpha_i)} = \beta_i = k, \quad \alpha_i = 0 \quad (6.11)$$

Une fonction réelle strictement bornée $u(p)$ qui rencontre ces conditions d'interpolation peut s'exprimer par :

$$u(p) = \frac{0.79}{(p+1)^2} \quad (6.12)$$

Par conséquent, le correcteur stabilisateur robuste pour $K = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1$ est donné par :

$$c(p) = \frac{\xi_1 L \xi_3 p}{V (p\xi_1 + V\xi_2) [p+2]} \quad (6.13)$$

L'implantation du correcteur pour une réponse à un échelon de 100 pixels en b a donné

les résultats exposés sur la figure 6.31. Ils confirment ceux obtenus en simulation (voir figure 6.30) pour les mêmes conditions d'expérimentation à l'échelle $\frac{1}{10}$.

Nous avons testé dans les mêmes conditions que la loi par placement de pôles (avec et sans intégrateur) et nous remarquons de meilleures performances au niveau des résultats. Tout d'abord, on constate une meilleure robustesse et stabilité du système vis-à-vis de la variation des paramètres du tangage α . En effet, des instabilités de la loi par placement de pôles (avec et sans intégrateur) apparaissent dès que l'angle de tangage est inférieur à 7 deg et supérieur à 9 deg en valeurs absolues.

6.3 Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre les résultats expérimentaux obtenus sur les lois de commande implantées sur deux types de robots : un véhicule agricole et un robot cartésien. L'aspect de la modélisation de l'interaction vision/commande est validé dans notre cas sur une machine agricole ainsi que par une identification sur notre robot portique.

Nous avons pu validé nos approches en utilisant deux types de méthodes de commande référencée vision robuste. La première est basée dans l'espace d'état et la seconde est une méthode basée dans l'espace fréquentiel. La méthode par placement de pôles tient compte des deux informations visuelles dans la synthèse de la loi de commande. Néanmoins, elle présente des erreurs statiques pour des variations paramétriques (angle de tangage par exemple). Une autre version de la loi de commande permet de considérer un intégrateur pour éliminer les erreurs statiques. Elle présente tout de même des oscillations importantes même si la consigne est atteinte.

Dans des conditions de fonctionnement difficiles (accélérations et freinages par exemple), il paraît nécessaire de doter le système de plus de robustesse. Nous avons illustré ce problème en testant nos lois de commande vis-à-vis des modifications paramétriques. Nous avons proposé une méthode robuste vis-à-vis des variations paramétriques basée dans l'espace H^∞ . La méthode H^∞ est la plus robuste car elle permet un fonctionnement correct du système dans une large bande de variation des paramètres (angle de tangage dans notre cas). Néanmoins, telle que la loi est présentée, nous n'avons aucun contrôle sur la valeur du paramètre a de la droite.

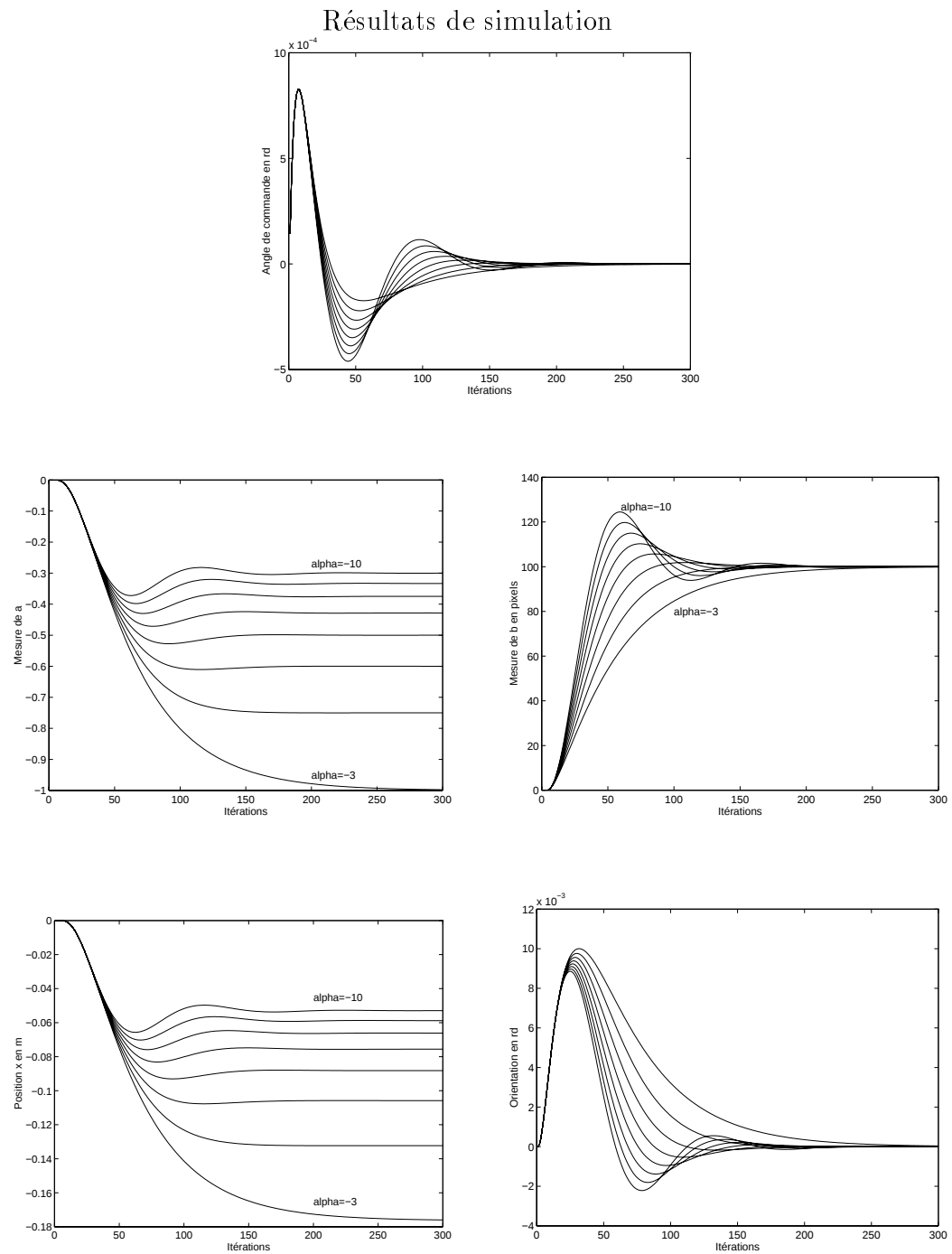
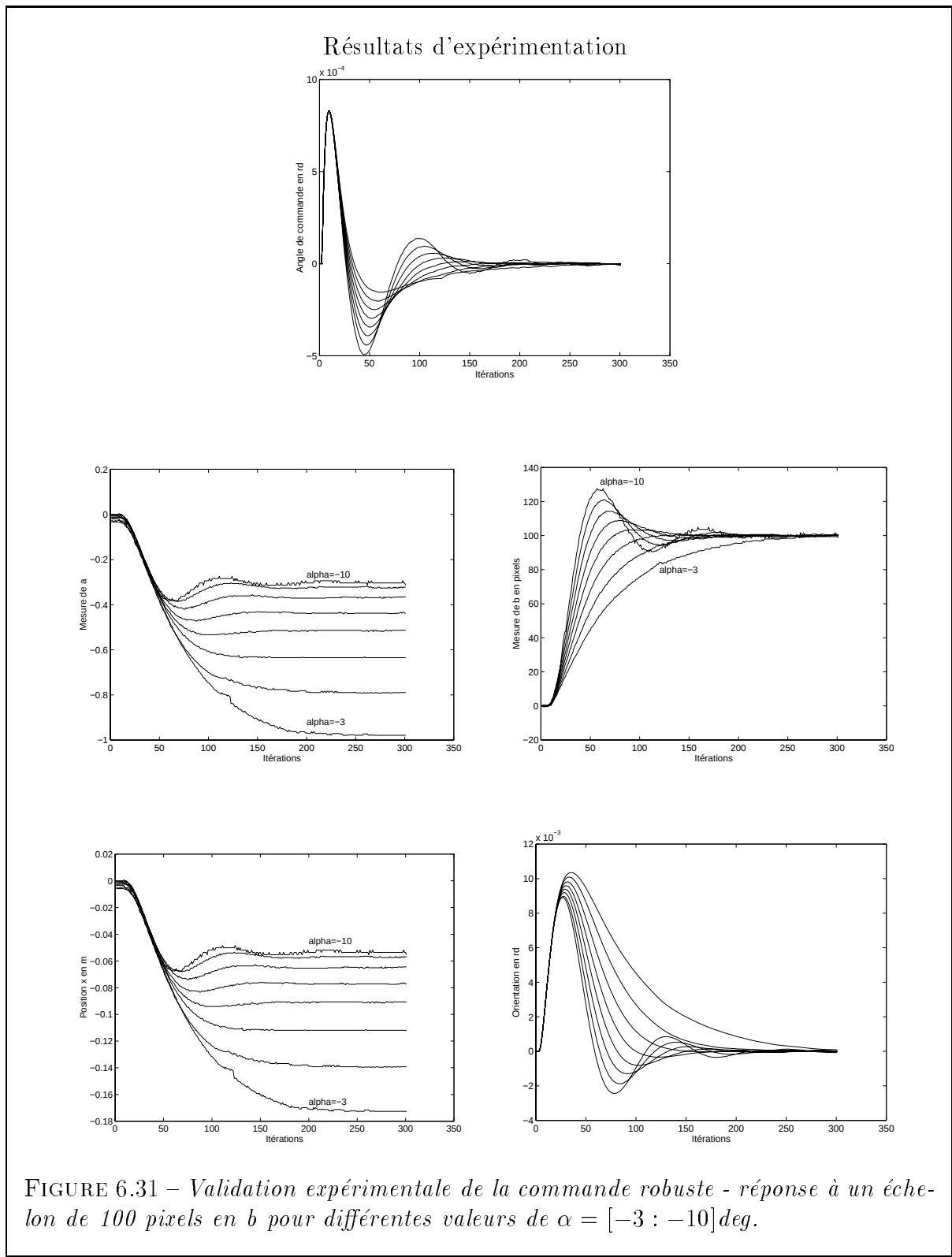


FIGURE 6.30 – Simulation de la commande robuste - réponse à un échelon de 100 pixels en b pour différentes valeurs de $\alpha = [-3 : -10]$ deg.



Conclusion générale

*Observers are not led by the same physical
evidence to the same picture of the
universes unless their linguistic backgrounds
are similar or can in some way calibrated*

Benjamin Lee Whorf

Bilan des travaux

Les travaux que nous avons présentés dans ce mémoire sont une contribution au contrôle latéral d'un robot mobile dans le cadre de la commande référencée vision. Il s'agit d'asservir le véhicule à une référence construite par des mesures de la scène fournies par une caméra embarquée. Deux approches ont été mises en œuvre dans cet objectif. La première approche est basée sur des techniques de placement de pôles. La seconde, plus générale, utilise des techniques de commande robustes. Dans les deux cas, on effectue des asservissements dans l'espace image de la caméra.

Ce choix est dû au fait que l'emploi des techniques basées sur un asservissement sur la situation de la caméra, présente l'inconvénient majeur de nécessiter une phase d'interprétation des informations visuelles, de manière à reconstruire la situation courante entre la caméra et son environnement. Les problèmes inhérents à cette interprétation sont de deux sortes [Chaumette 90] :

- les algorithmes qu'elle nécessite peuvent être extrêmement lourds dans le cas de scènes complexes, réduisant grandement la dynamique du système,
- les erreurs de précision de cette phase d'interprétation entraînent inévitablement des erreurs dans l'estimation de la situation courante, et de ce fait la convergence de l'algorithme peut être obtenue sans que la tâche soit réalisée.

L'approche que nous avons développée, basée dans l'espace image, permet d'éviter cette phase d'interprétation et d'être optimale au niveau du temps de calcul du moment

que les informations extraites sont directement utilisées dans la boucle de commande. L'une des conséquences de ces remarques réside dans le fait que notre approche possède l'avantage de s'affranchir du calibrage de la caméra dans la boucle principale d'asservissement. Néanmoins, un calibrage grossier est nécessaire afin de relier les mouvements 2D aux mouvements 3D, et non pas pour la reconstruction des points de la scène.

La première partie de ce mémoire a permis de dresser un état de l'art des méthodes de commande ainsi que de la vision en robotique mobile. A travers les différentes approches décrites nous pouvons faire ressortir trois points clé qui ont servi de fil conducteur par la suite. Il s'agit de la nécessité de disposer d'un modèle proche du comportement du système à commander, de choisir les informations visuelles à extraire de l'image, et de disposer d'un modèle adapté vis-à-vis de la méthode de commande pour répondre aux critères souhaités.

Tout au long de ce travail, les deux préoccupations ont été d'une part de valider nos deux approches de commande sur le plan expérimental et d'autre part de leur donner un aspect de généralité. Pour cela, nous avons traité deux exemples concrets. L'un est dédié au guidage d'un véhicule agricole qui s'insère dans le cadre d'une collaboration avec le CEMAGREF. L'autre exemple est dédié au pilotage d'un véhicule automobile en milieu routier. Ceci intervient suite à des travaux réalisés dans un projet sous contrat avec le constructeur automobile Peugeot S.A. Pour cela, nous avons mis au point une manipulation permettant de tester la conduite automatique à une échelle de laboratoire sur notre site expérimental grâce à un robot cartésien.

Nous avons expérimenté la première méthode dans diverses configurations. Notamment l'aspect cinématique et dynamique du comportement du véhicule automobile est testé. Une implantation discrète de la loi de commande a aussi été proposée. Nous avons mis en avant les avantages, les inconvénients ainsi que les limites d'une telle approche dans le cadre de l'application concernée. Il s'agit d'une méthode simple et efficace compte-tenu des conditions d'expérimentation. Cependant, l'impossibilité de traiter le cas des incertitudes de modèles et le manque de fiabilité dès lors que l'on sort du contexte fixé, en font une méthode de commande qui n'est pas robuste vis-à-vis d'incertitude paramétrique et réservée à une application ciblée.

Nous avons montré qu'il est possible de reformuler le problème de commande de façon différente au niveau de sa synthèse en introduisant l'aspect robustesse. Nous avons posé les principes de la nouvelle méthode, plus générale, tenant compte des incertitudes des paramètres du modèle de commande. Cette méthode est inspirée des principes concernant les problèmes d'optimisation et d'interpolation. Le modèle d'incertitude considéré est exprimé dans le domaine fréquentiel comme une fraction additive de la fonction de transfert du système nominal. L'annexe 2 contient le développement de la théorie de la commande robuste dans le cas précédemment cité. En effet, la théorie actuellement développée possède plusieurs limitations. Cela concerne surtout les cas où le système possède des pôles à l'origine. Le modèle de commande utilisé dans notre cas possède deux pôles à l'origine. Nous avons en conséquence adapté la méthode actuelle pour les cas des systèmes avec des

pôles à l'origine.

Un contrôleur latéral robuste est synthétisé et simulé sur une famille de modèles pour lesquels on a fait varier les paramètres d'incertitude. L'incertitude est caractérisée en déterminant expérimentalement pour chaque paramètre incertain du modèle une plage de variation bornée dans l'espace fréquentiel. Ensuite, les tests sont effectués en simulant la dynamique latérale par utilisation du modèle cinématique linéarisé du véhicule.

Les deux approches de commande et les différents concepts utilisés, notamment la notion d'identification et de la matrice d'interaction, d'incertitude et de robustesse ont été validés en simulation et/ou en expérimentation. Des résultats obtenus, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- Le contrôle latéral d'un robot mobile à roues directionnelles est possible en commande référencée vision en utilisant une caméra unique. La condition principale consiste à avoir toujours une vitesse longitudinale du robot non nulle. La variable d'état du système est principalement constituée des informations visuelles de la scène observée.
- La procédure d'identification expérimentale de la matrice d'interaction permet de valider le modèle élaboré et de calibrer le système de la caméra de manière suffisamment précise.
- La mise sous forme d'état du système permet de vérifier les conditions de commandabilité et de déterminer le domaine de validité du modèle.
- Le principe de la commande dans l'espace d'état utilisé est facilement généralisable pour tout type de robot mobile à roues directionnelles. En effet, une commande cinématique suffit pour des véhicules à faible vitesse (machine agricole ou véhicule automobile). Par contre, pour un déplacement à grande vitesse, une commande dynamique est suggérée.
- Les phénomènes de tangage et de roulis dus aux processus d'accélération ou de freinage et d'écrasement du véhicule produisent une dérive anormale dans le cas une commande dans l'espace d'état par placement de pôles.
- L'approche de commande H^∞ permet de modéliser les incertitudes paramétriques dues aux phénomènes de roulis et de tangage. Elle peut garantir la stabilité grâce à un contrôleur fixe dont l'incertitude est bornée.
- Une des limitations pratiques dans la synthèse du contrôleur robuste réside dans la manière de choisir la borne d'incertitude des paramètres. En effet, dans le cas où l'on a plusieurs paramètres incertains, on est limité dans l'amplitude des variations de ces paramètres qui risque de ne pas vérifier la condition d'existence d'un régulateur strictement bornée.

- La résolution et la maîtrise des problèmes de traitement d'images et du temps réel sont des conditions incontournables pour le succès des techniques d'asservissement visuel dans des applications réelles.

Perspectives

Les algorithmes de commande proposés dans cette étude donnent de bons résultats vis-à-vis des applications envisagées. Ils sont dédiés pour le contrôle latéral d'un véhicule dans l'image. Plusieurs perspectives peuvent se dégager du travail accompli.

La première perspective émane de la synthèse de la commande H^∞ .

- Nous avons vu que la recherche d'un correcteur robuste revient à résoudre un problème d'interpolation. Celui-ci est censé déterminer une fonction réelle strictement bornée $u(p)$ qui permet de calculer le correcteur robuste. Dans notre étude, nous avons déterminé $u(p)$ par examination et vérification des conditions d'interpolation. Cette méthode peut avoir des limites dans le sens où il n'est pas toujours possible de trouver une fonction $u(p)$ et donc $c(p)$ en fonction du comportement souhaité. Nous proposons d'étudier des méthodes d'interpolation permettant de traiter le problème de façon générale. Un des exemples peut être l'algorithme de *Nevanlinna-Pick* généralement utilisé pour des systèmes sans pôles à l'origine.
- Le modèle que nous avons développé et utilisé dans la commande robuste est représenté par une seule information visuelle (le paramètre b de la droite). Ce système peut présenter des irrégularités dans le cas où la mesure de l'information visuelle est erronée par exemple. L'idéal serait d'intégrer les deux informations visuelles dans la synthèse du correcteur robuste. Cela revient à résoudre le problème de commande sous forme matricielle en présentant les mêmes critères de robustesse.

La seconde perspective est liée au type de robot mobile utilisé et de la scène.

- Le véhicule considéré dans notre étude est un robot mobile à deux roues directrices. L'idée consiste à étendre et généraliser nos approches de contrôle latéral, pour d'autres types de robots mobiles non holonomes (tricycle, robot différentiel). On peut aussi envisager des robots disposés dans différentes configurations (convoi de voitures par exemple). De plus, si on modifie l'instrument de mesure, cela nécessite une phase de modélisation au préalable afin de calculer la matrice d'interaction.
- Nous n'avons traité dans notre cas qu'un seul type de primitives visuelles qui est une droite. Il serait intéressant d'étudier d'autres primitives visuelles telles qu'un arc de cercle ou courbure. Ce qui risque d'être problématique est le choix des indices visuels du motif choisi et la manière de les lier aux mouvements latéraux du robot mobile.

La troisième perspective peut être d'envisager, en plus du contrôle latéral, un contrôle longitudinal. Deux idées peuvent émerger de cette perspective.

- La première idée concerne la commande dynamique (latérale et longitudinale) d'un véhicule dans l'espace image. Cette question pourrait être résolue en considérant un découplage de la commande latérale et longitudinale. Il faudrait aussi définir le motif visuel d'asservissement longitudinal dans l'image. Le motif pour le déplacement latéral peut être le marquage au sol.
- La seconde idée concerne le problème générique de la stabilisation par rapport à une posture désirée dans l'image. Cela nécessite de considérer le modèle longitudinal du robot mobile. Dans ce cas, la contrainte non holonome de roulement sans glissement inhérente aux robots à roues apparaît et complique le problème. En général les récents travaux qui ont tenté de résoudre ce problème en 3D utilisent des méthodes issues de la théorie non linéaire, car on ne peut pas se contenter d'un modèle cinématique tangent. Nous proposons d'approcher le problème en testant d'abord la faisabilité de ces techniques dans l'espace image. Une des difficultés est le choix du motif visuel suffisant pour la réalisation de la tâche de stabilisation à une posture dans l'image.

Annexe A

Aspects théoriques sur la commande

Cette annexe présente les aspects théoriques de deux techniques de commande que nous avons adoptées dans le cadre de notre étude. La première partie concerne la synthèse de correcteurs dans l'espace d'état par un placement de pôles. La seconde partie présente une méthode robuste basée sur une technique H^∞ .

A.1 Commande dans l'espace d'état

A.1.1 Solution des équations d'état

Nous allons donner dans cette partie des rappels sur les solutions des équations d'état en continu et en discret, cas particuliers du cas général. Ces rappels servent dans notre cas à formaliser nos modèles en échantillonné et de pouvoir modéliser dans l'espace d'état le retard dû à la transmission de la commande.

A.1.1.1 Equations d'état linéaires continues

Nous allons étudier des équations linéaires d'ordre n exprimées par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) ; x(t_0) = x_0 \quad (\text{A.1})$$

où A (matrice d'état) et B (matrice de commande) sont des matrices $n \times n$ et $n \times p$ respectivement, dont les éléments sont réels et constants, et x est le vecteur d'état à n variables.

L'équation (A.1) est un cas particulier d'un système variant dans le temps (A et B dépendant du temps). Alors, les résultats dérivés du cas général peuvent être appliqués

dans ce cas. Tout d'abord, nous considérons la partie homogène de l'équation (A.1), à savoir :

$$\dot{x} = Ax(t); x(t_0) = x_0 \quad (\text{A.2})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$\dot{x} = \Phi(t, t_0)x_0 \quad (\text{A.3})$$

où $\Phi(t, t_0)$ est la matrice de transition de (A.1). La matrice d'état de transition est donnée par :

$$\Phi(t, t_0) = e^{A(t-t_0)} = \Phi(t - t_0) \quad (\text{A.4})$$

Si l'état initial est connu à $t = t_0$, la solution de l'équation (A.1) est donnée par :

$$\begin{cases} x(t) &= \Phi(t, t_0, x_0, u) \\ &= \Phi(t - t_0)x_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t - \tau)Bu(\tau)d\tau \\ &= e^{A(t-t_0)}x_0 + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

A.1.1.2 Equations d'état linéaires en commande échantillonnée

Le contrôleur numérique met en sortie une séquence de commandes $u(k)$, qui représentent les entrées du système. Cela est dû à l'existence d'une opération d'échantillonnage telle que :

$$u^+(kT + \tau) = u(kT); 0 \leq \tau < T, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{A.6})$$

Par conséquent,

$$u^+(t) = u(kT); kT \leq t < (k+1)T \quad (\text{A.7})$$

Cas général : le système peut être décrit par une équation d'état de la forme :

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu^+(t) \quad (\text{A.8})$$

où A et B sont, respectivement, des matrices $n \times n$ et $n \times p$ réelles constantes avec p la dimension de l'entrée u . La solution de l'équation (A.8) avec t_0 comme temps initial est :

$$x(t) = e^{A(t-t_0)}x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)}Bu^+(\tau)d\tau \quad (\text{A.9})$$

Dans notre cas l'entrée est échantillonnée, nous établirons donc la solution partant d'un instant d'échantillonnage $t_0 = kT$. A partir de (A.9), nous pouvons écrire

$$x(t) = e^{AT}x(kT) + \int_{kT}^t e^{A(t-\tau)}Bu^+(\tau)d\tau; kT \leq t < (k+1)T \quad (\text{A.10})$$

Si nous sommes intéressés par la réponse aux instants d'échantillonnage seulement, nous posons $t = (k+1)T$. Dans la réponse à $u^+(k)$, l'état n'est obtenu aux valeurs $x[(k+1)T] \equiv x(k+1)$ qu'à l'application de $u^+(k+1)$, i.e :

$$x(k+1) = Fx(k) + Gu^+(k) \quad (\text{A.11})$$

où

$$F = e^{AT} \quad (\text{A.12})$$

$$G = \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A[(k+1)T-\tau]} B d\tau \quad (\text{A.13})$$

Pour évaluer F , nous utilisons son développement en série infinie exprimé par :

$$F = e^{AT} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{A^i T^i}{i!}; A^0 = I \quad (\text{A.14})$$

Pour la matrice G on pose $\sigma = (\tau - kT)$ dans (A.13) pour obtenir :

$$G = \int_0^T e^{A(T-\sigma)} B d\sigma \quad (\text{A.15})$$

Si $\theta = T - \sigma$, nous obtenons alors :

$$G = \int_0^T e^{A\theta} B d\theta \quad (\text{A.16})$$

L'intégrale G donnée par (A.16) peut être évaluée terme à terme pour donner :

$$G = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{A^i T^{i+1}}{(i+1)!} B = (e^{AT} - I)A^{-1}B \quad (\text{A.17})$$

avec A non-singulière. Finalement nous pouvons écrire :

$$x(k+1) = e^{AT}x(k) + (e^{AT} - I)A^{-1}Bu^+(k) \quad (\text{A.18})$$

Si nous sommes intéressés par la valeur de $x(t)$ entre deux instants, on résout en premier lieu $x(kT)$ pour tout k en utilisant l'équation (A.11), puis nous considérons la relation (A.10) pour calculer $x(t)$ pour $kT \leq t < (k+1)T$. L'équation (A.11) représente une simulation discrète d'un système continu.

Système avec retard : si l'entrée du système est retardée de dT , la solution est donnée alors par :

$$x(k+1) = e^{AT}x(k) + Gu^+(k-d) \quad (\text{A.19})$$

Nous pouvons exprimer la variable d'état à $x(k+d)$ par :

$$x(k+d) = e^{AdT}x(k) + \sum_{i=1}^d e^{(i-1)AT}Gu^+(k-i) \quad (\text{A.20})$$

Une fois les équations d'un système établies, nous allons nous intéresser dans la partie suivante au principe de commande, dite modale, adoptée pour la synthèse des lois de commande. La technique retenue pour cela est basée sur le placement de pôles.

A.1.2 Commande modale

Pour illustrer la méthode de commande en question, nous considérons un système linéaire invariant exprimé par les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

Supposons que pour ce système la loi de commande dépende linéairement de $r(t)$ et $x(t)$ et soit de la forme :

$$u(t) = r(t) - Gx(t) \quad (\text{A.22})$$

où $r(t)$ représente l'entrée de référence et G est une matrice constante appelée matrice de réaction ou de commande. Le modèle d'état du système en boucle fermée est alors donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A - BG)x(t) + Br(t) \\ y(t) = (C - DG)x(t) + Dr(t) \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

qui peut être représenté schématiquement par la figure (A.1).

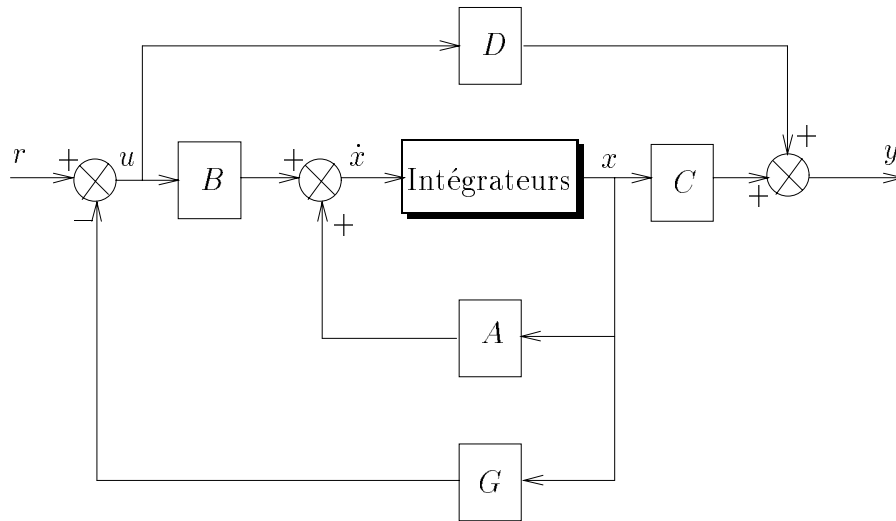


FIGURE A.1 – Structure de commande d'un système dans l'espace d'état.

Cette approche est une méthode de placement de pôles. Nous allons la détailler dans ce qui suit.

A.1.2.1 Placement de pôles par réaction d'état

Le placement de pôles que nous étudions ici est basé sur l'utilisation de décompositions particulières et structurelles du système. Le problème peut être expliqué en le divisant en trois étapes :

- mettre le système dans une forme canonique appropriée,
- recherche d'un contrôleur en boucle fermée associé à cette forme,
- exprimer la commande dans le système de coordonnées d'origine.

Formule directe - seconde forme compagne : supposons que le système d'équations d'état d'ordre n soit donné par (A.21), soit complètement commandable¹. Le problème que nous nous posons ici est de trouver une loi de commande du type :

$$u = -Gx + r \quad (\text{A.24})$$

telle que le système de réaction donnée par : $\dot{x} = (A - BG)x + Br$ possède une équation caractéristique donnée de degré n . Si l'on souhaite exprimer r en fonction de la valeur de consigne définie par y^c de sorte que $r = ly^c$, l'expression de l peut être exprimée en évaluant y et x à l'infini. Dans ce cas on peut écrire :

$$y(\infty) = Cx(\infty) = y^c \quad (\text{A.25})$$

Sachant que :

$$x(\infty) = -(A - BG)^{-1}ly^c \quad (\text{A.26})$$

on aboutit finalement à l'expression générale de l donnée par :

$$l = -[C(A - BG)^{-1}B]^{-1} \quad (\text{A.27})$$

la première étape consiste à mettre le système sous une forme compagne qui consiste à transformer les équations (A.21) en définissant $x^* = Px$ de sorte que :

$$A^* = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots & -\alpha_{n-1} & -\alpha_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.28})$$

Si de plus l'équation caractéristique du système bouclé par G est exprimé par : $\lambda^n + \alpha_1^*\lambda^{n-1} + \dots + \alpha_n^*$, dans ce cas, la matrice des gains donnée par :

$$G^* = [g_1^*, g_2^*, \dots, g_n^*] \quad (\text{A.29})$$

1. Un système est dit complètement commandable si la matrice de commandabilité donnée par $Q = [A \ AB \ \dots \ A^{n-1}B]$ est de rang plein égal à n).

résultante de la transformation précédente est directement donnée par : $g_n^* = \alpha_n^* - \alpha_n$. La loi de commande exprimée dans le système original est ensuite donnée par :

$$G = G^* P \quad (\text{A.30})$$

La matrice désirée P est obtenue comme le produit de deux matrices V et U telle que $P = VU$. Dans cette seconde forme compagne, il est facile de déduire les matrices U et V . On peut montrer que U^{-1} est la matrice de commandabilité donnée par [Friedland 87] :

$$Q = U^{-1} = [B, AB, \dots, A^{n-1}B] \quad (\text{A.31})$$

et que V^{-1} est la transposée de la matrice triangulaire inférieure de Toeplitz de A^* telle que :

$$W = V^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 & \dots & \alpha_{n-1} \\ 0 & 1 & \dots & \alpha_{n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.32})$$

Finalement, la loi de commande s'exprime par la formule de Bass-Gura suivante [Bass 65] :

$$G = \left[(QW)^{-1} \right]^T G^* \quad (\text{A.33})$$

Cette seconde forme compagne nous permet d'avoir l'expression de la matrice G directement proportionnelle à la matrice de commandabilité Q ainsi qu'au gain G^* . Deux remarques sont à signaler :

- la première est relative à la commandabilité du système. En effet, l'existence de G est conditionnée par la commandabilité du système qui exige que la matrice Q soit de rang plein et donc, non-singulière. Dès que le déterminant de Q est nul, le système devient non commandable et par conséquent la transformation des équations est impossible.
- la seconde est liée au choix des coefficients de l'équation caractéristique désirée. L'expression de G^* représente une différence entre les coefficients de l'équation caractéristique du système désiré α_i^* et ceux du système d'origine α_i . Cependant, le choix de ces paramètres revient à fixer les pôles du système en boucle fermée.

La stratégie générale à adopter pour faire un bon placement de pôles est expliquée dans le paragraphe suivant.

A.1.2.2 Optimisation du placement de pôles

Nous donnons quelques interprétations à propos de la signification de la loi de commande élaborée par l'équation (A.33) ainsi que la stratégie à adopter afin de mieux placer les pôles d'un système en boucle fermée.

Pratiquement, les pôles d'un système commandable en boucle fermée peuvent être placés sur tout le plan imaginaire. Néanmoins, la vraie question est de savoir où «*doivent*» ils être placés si nous souhaitons garantir des conditions ou les performances définies au préalable. La question se transforme donc et revient à relier les exigences des performances demandées à la matrice du gain G utilisée dans la mise en œuvre de la loi de commande en boucle fermée.

La loi de commande pour un régulateur s'exprime en fonction de l'état du système par : $u = -Gx$. Par conséquent, pour une valeur élevée de l'état donné x implique que l'entrée du contrôleur soit aussi grande. D'un autre côté, en pratique, les systèmes sont limités du point de vue de l'entrée des actionneurs. Si le signal de commande produit par la loi de réaction linéaire $u = -Gx$ est plus grand que possible ou admissible pour des raisons de sécurité, les actionneurs saturent.

L'effet du gain du système de commande par placement des pôles peut être analysé en interprétant la formule de Bass-Gura [Bass 65]. Notons que les gains sont proportionnels à l'ensemble des pôles à placer, c'est-à-dire à la distance des coefficients du polynôme caractéristique entre la boucle ouverte et la boucle fermée. En effet, moins les pôles sont déplacés, plus la matrice des gains est faible. Donc, un système à large gains est évité en limitant les changements dans les coefficients de l'équation caractéristique. Il faut noter aussi que les gains sont inversement proportionnels à la matrice de commandabilité. Ceci nous donne les conditions de commandabilité du système.

L'une des raisons pour modifier le comportement d'un processus est sa stabilisation. S'il est instable, on essayera de déplacer ses pôles à l'intérieur de la partie gauche du plan complexe. La stabilité s'impose comme étant le critère le plus important, mais ce n'est pas l'unique considération. Le temps de réponse est aussi important, traduisant la bande passante du système. En effet, une réponse rapide (bande passante large) du système en boucle fermée est toujours recherchée. Néanmoins, si l'entrée est entachée d'un bruit, il est souhaitable de réduire la bande passante afin de prévenir que le système devienne agité en suivant ce bruit. Une autre raison pour limiter la bande passante d'un système en boucle fermée est l'incertitude de la dynamique haute fréquence du processus. On peut donner l'exemple d'un système mécanique qui possède des effets de résonance qui ne sont pas modélisés en général.

En plaçant les pôles d'un système, on fixe ainsi sa bande passante. Celle-ci est liée premièrement à ses pôles dominants dont les pôles ont la partie réelle proche de l'origine. Pour voir cet effet il suffit d'examiner les pôles de la fonction de transfert. Les termes correspondant aux pôles dont la partie réelle négative sont loin de l'origine déclenchent un dépassement important dans la réponse transitoire du système. Leur contribution est moindre dans le comportement global par rapport aux pôles dont la partie réelle est proche de l'origine.

Si l'on souhaite faire décroître rapidement la réponse transitoire d'un système par des pôles qui soient loin de l'origine, il faudrait avoir une possibilité de pouvoir changer rapidement l'énergie dans le système qui nécessite des entrées de commande larges. En

revanche, si l'on dispose de pôles éloignés de l'origine et des pôles proches de celui-ci, l'amplitude maximum de la commande va être fixée par les premiers, alors que la vitesse de réponse est ralentie par les derniers pôles. Ce comportement montre que les gains de réaction sont tels que la commande en question n'est pas utilisée efficacement. Une utilisation efficace du signal de commande nécessite que tous les pôles soient à la même distance de l'origine. L'optimisation du placement de pôles entre dans le cadre de la commande optimale qui présente la commande d'un système comme un critère à optimiser.

Dans cette partie nous avons étudié une méthode de commande dans l'espace d'état. Une telle méthode nécessite une connaissance parfaite du modèle d'état. L'un des problèmes que nous nous posons dans le cadre de notre étude est de résoudre le même type d'asservissement visuel, mais en considérant les fluctuations éventuelles des paramètres du modèle. Pour cela, nous avons opté pour une méthode robuste basée sur une technique H^∞ que nous présentons dans le paragraphe suivant.

A.2 Commande par une approche H^∞

A.2.1 Introduction

Dans la commande robuste le correcteur est fixé et satisfait les performances exigées sans aucun ajustement supplémentaire. L'objectif d'un correcteur robuste est de garantir la stabilité en souhaitant des performances vis à vis des variations des paramètres du modèle. En effet, l'élaboration d'un contrôleur robuste est conditionnée par le modèle d'incertitude du système. On peut classer l'incertitude en deux grandes catégories : l'incertitude structurée et l'incertitude non-structurée selon les informations disponibles du système. Elle peut être exprimée dans l'espace temporel par un modèle d'état ou bien dans le domaine fréquentiel par un modèle sous forme d'une fonction de transfert.

Les différents types de modélisations d'incertitudes sont classées en quatre catégories suivantes :

- incertitude non-structurée temporelle,
- incertitude structurée temporelle,
- incertitude non-structurée fréquentielle,
- incertitude structurée fréquentielle.

L'incertitude non-structurée fréquentielle peut aussi être divisée en une perturbation additive, une perturbation à entrée multiplicative et une perturbation à sortie multiplicative. Leur fonction de transfert sont données respectivement par : $F_0(p) + \delta F(p)$, $F_0(p)(I + R(p))$ et $(I + L(p))F_0(p)$ telle que $F_0(p)$ est la fonction de transfert du système nominal.

Avant d'exposer la méthode de commande en question, quelques définitions s'imposent pour comprendre le vocabulaire utilisé dans cette partie, notamment l'*espace Hardy*, l'*espace H^∞* et la *fonction Schur*, que nous donnons dans ce qui suit.

- **Espace Hardy** : espace de toute fonction complexe $F(p)$ d'un nombre complexe p qui est analytique dans $\text{Re } p > 0$.
- **Espace H^∞** : espace de fonctions Hardy pour lesquelles la norme H^∞ , définie par :

$$\|F(p)\|_\infty = \sup_{\omega} |F(j\omega)| \quad (\text{A.34})$$

est bornée, c'est-à-dire :

$$\|F(p)\|_\infty < \infty \quad (\text{A.35})$$

- **Fonction Schur** : fonction H^∞ complexe dont la norme H^∞ est bornée par 1.

Nous allons maintenant donner les éléments de base de la théorie de la commande robuste, que nous avons étudiée et appliquée dans notre cas, en considérant un modèle d'incertitude avec perturbations additives non-structurées [Dorato 92]. Commençons d'abord par donner la condition de stabilité robuste pour un système à une seule entrée et une seule sortie.

A.2.2 Condition de stabilité robuste

Pour illustrer la notion de stabilité robuste nous allons prendre l'exemple d'un système à une seule entrée et une seule sortie schématisé par la figure A.2 où $F(p)$ est la fonction de transfert du système et $c(p)$ est la fonction de transfert du correcteur. Si de plus l'incertitude du système est modélisée par des perturbations additives non-structurées, la définition suivante permet de décrire les variations de la réponse fréquentielle du système.

Définition : notion de classe

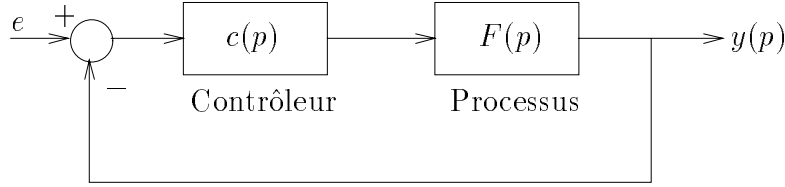
Une fonction transfert $F(p)$ est dite de classe $C(F_0(p), r(p))$ si :

- $F(p)$ a le même nombre de pôles instables que $F_0(p)$;
- $|F(j\omega) - F_0(j\omega)| \leq |r(j\omega)|$, $|r(j\omega)| > 0 \quad \forall \omega$.

Etant donné un contrôleur $c(p)$ qui stabilise $F_0(p)$, nous pouvons établir des conditions de stabilisation robuste sur $c(p)$ pour tous les systèmes de classe $C(F_0(p), r(p))$. Notons :

$$\begin{cases} F(p) = F_0(p) + \Delta F(p) \\ |\Delta F(j\omega)| \leq |r(j\omega)| \quad \forall \omega \end{cases} \quad (\text{A.36})$$

un système générique de classe $C(F_0(p), r(p))$ et supposons pour la suite que $r(j\omega)$ est une fonction de transfert à minimum de phase. A partir de l'hypothèse que $c(p)$ stabilise

FIGURE A.2 – *Système de correction en boucle fermée.*

$F_0(p)$, nous avons

$$F_0(j\omega)c(j\omega) + 1 \neq 0 \quad \forall \omega \quad (\text{A.37})$$

Le produit $F_0(j\omega)c(j\omega)$ possède un nombre correct d'encerclements autour du point -1 garantissant, par le critère de stabilité de *Nyquist*, que le système nominal en boucle fermée est stable. Si $F_0(p)$ et le système perturbé $F(p)$ ont le même nombre de pôles instables alors $1 + F(j\omega)c(j\omega)$ peut être écrit sous la forme :

$$[1 + F_0(j\omega)c(j\omega)] [1 + [1 + F_0(j\omega)c(j\omega)]^{-1}c(j\omega)\Delta F(j\omega)] \quad (\text{A.38})$$

Le critère de *Nyquist* est aussi valable du fait du nombre d'encerclements autour du point -1 et ne changera donc pas le système perturbé $F(p)$ tant que [Doyle 81] :

$$\sup_{\omega} |(1 + F_0(j\omega)c(j\omega))^{-1}c(j\omega)\Delta F(j\omega)| < 1 \quad (\text{A.39})$$

Par conséquent, une condition suffisante de stabilité robuste est alors donnée par [Kimura 84] :

$$\|(1 + F_0(p)c(p))^{-1}c(p)r(p)\|_{\infty} < 1 \quad (\text{A.40})$$

En introduisant la paramétrisation q donnée par :

$$q(p) = \frac{c(p)}{1 + F_0(p)c(p)} \quad (\text{A.41})$$

la condition (A.40) s'écrira simplement en fonction de $q(p)$ par :

$$\|q(p)r(p)\|_{\infty} < 1 \quad (\text{A.42})$$

En plus de la condition de stabilité robuste décrite par l'équation (A.42), il est souhaitable de garantir la stabilité interne du système que l'on abordera dans le paragraphe suivant.

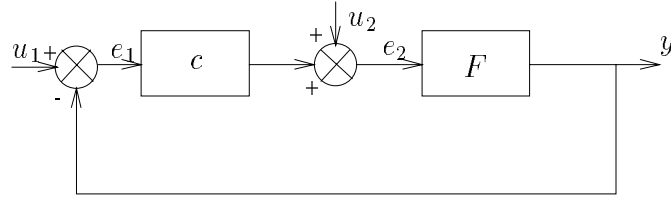


FIGURE A.3 – Configuration générale d'un système en boucle fermée.

A.2.3 Stabilité interne

Considérons la configuration d'une boucle de réaction standard de la figure A.3 où $u_1(p)$ représente l'entrée de la consigne du système et $u_2(p)$ est une entrée de perturbation quelconque. A partir de cette configuration, nous allons définir les conditions qui garantissent la stabilité interne de ce système. Pour cela, il suffit de construire toutes les fonctions de transfert combinées entre (u_1, u_2) et (e_1, e_2) . Notons par H la matrice dont les éléments sont les fonctions de transfert en question. On peut écrire que :

$$\begin{pmatrix} e_1(p) \\ e_2(p) \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} u_1(p) \\ u_2(p) \end{pmatrix} \quad (\text{A.43})$$

telle que H s'exprime par :

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + Fc} \begin{bmatrix} 1 & -F \\ c & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.44})$$

Le système en boucle fermée de la figure A.3 garantit la stabilité interne si toutes les fonctions de transfert de la matrice H sont bornées en entrée et en sortie, c'est-à-dire des fonctions H^∞ . Il implique que tout signal borné injecté sur $u_1(p)$ ou $u_2(p)$ donne une réponse bornée en tout point du modèle du système.

En introduisant la fonction $q(p)$ définie par le changement de variables suivant :

$$q(p) = \frac{c(p)}{1 + F(p)c(p)} \quad (\text{A.45})$$

le contrôleur $c(p)$ peut être exprimé en fonction de $q(p)$ par la relation inverse suivante :

$$c(p) = \frac{q(p)}{1 - F(p)q(p)} \quad (\text{A.46})$$

et de ce fait la matrice H devient alors :

$$H = \begin{bmatrix} 1 - Fq & -F(1 - Fq) \\ q & 1 - Fq \end{bmatrix} \quad (\text{A.47})$$

A travers l'expression de la matrice H , nous aboutissons à des conditions sur $q(p)$ pour la stabilité interne du système qui se résument dans les trois points suivants [Zames 83] :

1. $q(p) \in H^\infty$,
2. $q(p)$ doit avoir des zéros dans le demi-plan droit,
3. $F(p)q(p)$ doit être interpolé à un dans le demi-plan droit.

Finalement, pour exprimer le correcteur $c(p)$, il suffit d'exprimer $q(p)$ qui doit respecter ces trois conditions qui garantissent la stabilité interne du système. La question qui se pose à présent est de savoir comment exprimer cette fonction en respectant les points cités ci-dessus. Dans cette optique, il suffit de développer une paramétrisation générale pour toutes fonctions $q(p)$.

En premier lieu, nous supposons que $F(p)$ n'a pas de pôles sur l'axe $j\omega$ et que $q(p)$ peut se mettre sous la forme :

$$q(p) = B(p)\tilde{q}(p) \quad (\text{A.48})$$

avec

$$\begin{cases} \tilde{q}(p) \in H^\infty \\ B(p) = \Pi \left(\frac{\alpha_i - p}{\bar{\alpha}_i + p} \right), \quad |B(j\omega)| \equiv 1 \quad \forall \omega \end{cases} \quad (\text{A.49})$$

où α_i sont les pôles de la fonction de transfert $F(p)$ dans $\text{Re}(p) > 0$ et $B(p)$ est appelé produit *Blaschke* des pôles de $F(p)$ sur le demi-plan droit. Nous pouvons remarquer que si tous les pôles de $F(p)$ sont simples alors les deux premières conditions qui garantissent la stabilité interne sont automatiquement satisfaites.

Traisons maintenant le cas de la troisième condition. Pour cela, nous considérons que la fonction de transfert du système peut s'écrire en fonction de $B(p)$ par :

$$\tilde{F}(p) = B(p)F(p) \quad (\text{A.50})$$

Par conséquent, les égalités suivantes sont valables :

$$F(p)q(p) = \frac{\tilde{F}(p)}{B(p)}B(p)\tilde{q}(p) = \tilde{F}(p)\tilde{q}(p) \quad (\text{A.51})$$

Afin d'assurer la troisième condition de stabilité interne, il faut que $\tilde{q}(\alpha_i)$ satisfasse les conditions d'interpolations suivantes :

$$\tilde{q}(\alpha_i) = \frac{1}{\tilde{F}(\alpha_i)} \quad (\text{A.52})$$

On peut considérer que le problème de synthèse de stabilité nominale interne, que nous avons traité, est réduit au problème d'interpolation qui permet de trouver une fonction

$\tilde{q}(p) \in H^\infty$ pour $p = \alpha_i$. Ensuite, on calcule le compensateur $q(p) = B(p)\tilde{q}(p)$ et finalement $c(p) = q(p)/(1 - F(p)q(p))$.

Après avoir donné la condition de stabilité robuste ainsi que les conditions de stabilité interne d'un système, nous allons exploiter ces résultats afin d'aboutir à une formulation globale pour la synthèse d'un correcteur robuste.

A.2.4 Synthèse du correcteur robuste

Nous considérons la condition de stabilité robuste donnée par l'équation (A.42) pour laquelle on introduit le changement de variable donné par l'équation (A.48). Cette condition peut être écrite, puisque l'amplitude de $B(p)$ est égale à 1 $\forall w$, par :

$$\|\tilde{q}(p)r_m(p)\|_\infty < 1 \quad (\text{A.53})$$

On désigne par $r_m(p)$ une fonction H^∞ à minimum de phase telle que :

$$|r_m(j\omega)| = |r(j\omega)| \quad (\text{A.54})$$

En introduisant la fonction $u(p) = \tilde{q}(p)r_m(p)$, la condition de stabilité robuste devient alors :

$$\|u(p)\|_\infty < 1 \quad (\text{A.55})$$

Cette relation implique que $u(p)$ doit être une fonction réelle strictement bornée puisque $r_m(p)$ et $\tilde{q}(p)$ sont des fonctions H^∞ .

Finalement, le problème de la stabilité robuste est réduit à un problème d'interpolation qui consiste à trouver une fonction réelle strictement bornée $u(p)$ donnée par :

$$u(\alpha_i) = \tilde{q}(\alpha_i)r_m(\alpha_i) = \frac{r_m(\alpha_i)}{\tilde{F}_0(\alpha_i)} = \beta_i \quad (\text{A.56})$$

qui interpole à des points donnés sur le demi-plan droit. Ceci est connu comme le problème d'interpolation de Nevanlinna-Pick [Delsatre 81].

Le compensateur stabilisateur robuste $c(p)$ est calculé en suivant les différentes étapes ci-dessous :

Etape 1: Calculer $r_m(p)$, $\tilde{F}_0(p)$ et $B(p)$

Etape 2: Trouver une fonction réelle strictement bornée $u(p)$ telle que

$$u(\alpha_i) = \beta_i = \frac{r_m(\alpha_i)}{\tilde{F}_0(\alpha_i)}$$

Etape 3: Calculer $q(p) = \frac{B(p)u(p)}{r_m(p)}$

Etape 4: Calculer $c(p) = \frac{q(p)}{1 - F_0(p)q(p)}$

A.2.5 Systèmes avec pôles à l'origine

Si $F_0(p)$ a un pôle à l'origine ($p = 0$), il est possible d'étendre la méthode décrite ci-dessus. Si l'on suppose que le pôle est conservé sous les perturbations, alors l'incertitude $r(p)$ doit avoir aussi un pôle à l'origine ($p = 0$). Donc, il est possible d'écrire :

$$r(p) = \frac{r_m^*(p)}{p} \quad (\text{A.57})$$

où r_m^* est une fonction H^∞ à minimum de phase. Si nous posons aussi :

$$\begin{cases} \tilde{F}(p) = pB(p)F_0(p) \\ \tilde{q}(p) = \frac{q(p)}{pB(p)} \end{cases} \quad (\text{A.58})$$

la condition de stabilité robuste devient alors

$$\|q(p)r(p)\|_\infty = \|\tilde{q}(p)r_m^*(p)\|_\infty < 1 \quad (\text{A.59})$$

Si de plus :

$$u(p) = \tilde{q}(p)r_m^*(p) \quad (\text{A.60})$$

le problème revient maintenant à trouver une fonction réelle strictement bornée $u(p)$ avec les conditions d'interpolation :

$$\begin{cases} u(\alpha_i) = \beta_i = \frac{r_m^*(\alpha_i)}{\tilde{F}_0(\alpha_i)} \\ u(0) = \beta_0 = \frac{r_m^*(0)}{\tilde{F}_0(0)}; \end{cases} \quad (\text{A.61})$$

Avec ces conditions d'interpolation, nous garantissons que :

$$F_0(p)q(p) = \tilde{F}_0(p)\tilde{q}(p) \quad (\text{A.62})$$

est égal à un, au pôle instable de $F_0(p)$. Par conséquent, le correcteur $c(p)$ garantit la stabilisation de $F_0(p)$.

Annexe B

Principe et procédure d'identification

B.1 Principe

Le principe consiste à estimer les paramètres d'un modèle de structure ARMAX (AutoRégressive à Moyenne Ajustée et variable eXogène) par une méthode d'estimation de l'erreur de prédiction. Le schéma synoptique d'un tel modèle est donné en figure B.1 dont les paramètres sont les suivants :

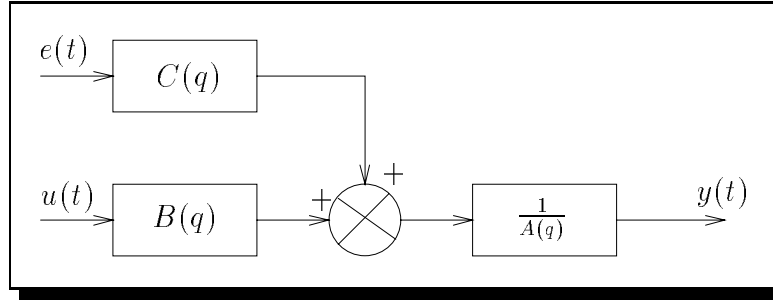
$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + C(q)e(t) \quad (\text{B.1})$$

avec :

$$\begin{cases} A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b+1} \\ C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

tels que :

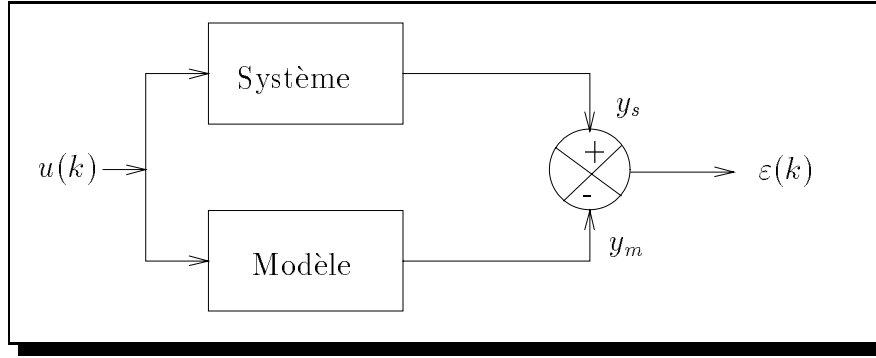
- $u = (\dot{x}, \dot{\psi})$ est l'entrée du système,
- $y = (a, b)$ sa sortie,
- n_a, n_b et n_c sont les degrés des polynômes $A(q)$, $B(q)$ et $C(q)$ respectivement,
- n_k représente le retard de l'entrée par rapport à la sortie,
- le paramètre q est un opérateur mathématique de retard tel que $q^{-1}x(k) = x(k-1)$.

FIGURE B.1 – *Structure ARMAX.*

Une fois que la structure du modèle est choisie, on cherchera à régler ses paramètres au mieux selon un critère bien choisi. On appelle erreur de sortie la différence entre la sortie du système et celle du modèle (cf figure B.2) notée $\varepsilon(k)$. Cette erreur doit être la plus proche possible de zéro pour une meilleure identification. Dans ce cas les nombres n_a , n_b , n_c et n_k sont correctement choisis et par conséquent l'erreur de prédiction $\varepsilon(k)$ tend asymptotiquement vers un bruit blanc. Ceci se traduit par :

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E(\varepsilon(k)\varepsilon(k-i)) = 0 \quad i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (\text{B.3})$$

avec E désigne l'espérance mathématique.

FIGURE B.2 – *Erreur de sortie pour un mode parallèle.*

En général, on ne se contente pas seulement de chercher la meilleure valeur pour les paramètres au sens du critère choisi, mais on souhaite aussi évaluer l'incertitude qui doit être associée à ce résultat. Pour cela nous avons différents tests possibles pour évaluer le résultat de l'identification. Parmi ces tests figure le test de blanchissement de l'erreur de prédiction. On définit pour cela la fonction d'autocorrélation (ou de covariance) $R(i)$ ainsi que la fonction d'autocorrélation (ou covariance normalisée) $RN(i)$ par [Landau 88] :

$$\begin{cases} R(i) = E(\varepsilon(k)\varepsilon(k-i)) \\ RN(i) = \frac{R(i)}{R(0)} \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

Si la séquence des erreurs de prédiction résiduelles est parfaitement blanche alors on a $RN(0) = 1$ et $RN(i) = 0$. $\varepsilon(k)$ représente la séquence centrée des erreurs de prédiction résiduelles, égale à la différence de la valeur mesurée par rapport à la valeur moyenne.

Les différentes étapes de l'algorithme d'identification que nous avons mises au point sont résumées comme suit :

- (1) choix de la structure du modèle d'identification désiré, ARMAX dans notre cas, caractérisé par le degré et le retard,
- (2) constitution d'un fichier E/S pour le modèle identifié en utilisant la même séquence d'entrée que pour le procédé,
- (3) constitution d'un fichier des erreurs de prédiction pour le modèle identifié par calcul de la fonction d'autocorrélation e et de la fonction d'intercorrélation entre e et l'entrée u ,
- (4) test de blancheur (d'indépendance) sur la séquence d'erreurs de prédiction par estimation de la fonction d'autocorrélation,

B.2 Procédure d'identification

La fonction de transfert $G_i(p)$ que nous recherchons représente le rapport de la transformée de Laplace de la sortie (a ou b) sur l'entrée du système ($\dot{x}$ ou $\dot{\psi}$). Elle peut se mettre sous la forme de la fonction de transfert d'une commande en vitesse :

$$G_i(p) = e^{-\tau_d p} \frac{\mu_i}{p(1 + \tau_i p)} \quad (\text{B.5})$$

où :

- $\tau_d = (n_k - 1)T_s$ représente le retard introduit par le système (robot et traitement d'image) avec T_s étant la période d'échantillonnage du système,
- μ_i sont les différents paramètres utilisés dans la matrice d'interaction représentant les gains statiques des différentes fonctions de transfert,
- τ_i sont les constantes de temps relatives à chaque μ_i ,
- p est la variable de Laplace.

En faisant la transformée de Laplace de la matrice d'interaction, nous aboutissons à la fonction de transfert $G(p)$ suivante :

$$G(p) = \begin{pmatrix} \frac{\mu_1}{p} & 0 \\ \frac{\mu_2}{p} & \frac{\mu_3}{p} \end{pmatrix} \quad (\text{B.6})$$

En effet, l'identification nous permettra de mettre en correspondance les fonctions de transfert données par B.5 et B.6 en négligeant la constante de temps τ_i et en mettant en évidence le retard τ_d de l'équation B.5. On justifiera à chaque fois toutes les étapes simplificatrices de cette mise en correspondance de modèles.

La procédure d'identification des paramètres μ_i du modèle de l'équation (6.2) est faite en utilisant des algorithmes d'identification sous *Matlab*. Sous *Matlab* le système est modélisé dans l'espace des z donnée sous forme de fonction de transfert polynômiale suivante :

$$G_i(z) = \frac{b_1 + b_2 z + b_3 z^2 + \dots + b_{n_b+1} z^{n_b+1}}{1 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_{n_a} z^{n_a}} \quad (\text{B.7})$$

que l'on peut convertir en continu en utilisant un bloqueur d'ordre zéro sur les entrées. On utilise pour cela la transformation en z suivante :

$$\begin{cases} G_i(z) = T Z(B_0(p)G_i(p)) \\ B_0(p) = \frac{1 - \exp^{-pT_s}}{p} \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

Annexe C

Identification de μ_1 et μ_3

C.1 Identification de μ_1 :

La figure C.1 représente la mesure de a donnée par le traitement de l'image. Nous avons identifié la fonction de transfert suivante :

$$G_1(p) = \frac{a(p)}{V_x(p)} = e^{-3T_s p} \frac{1.72}{p(1 + 0.026p)} \quad (\text{C.1})$$

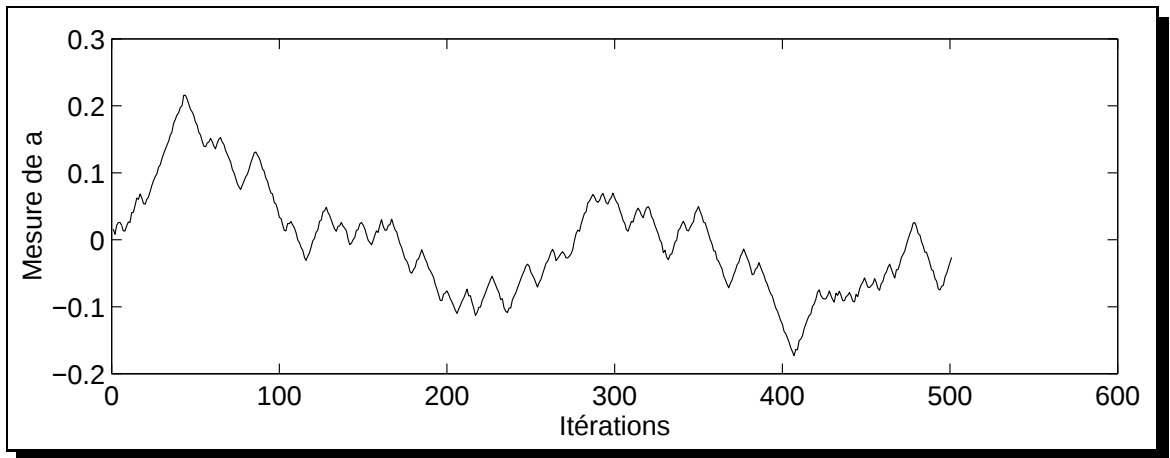


FIGURE C.1 – Identification de μ_1 - Commande de l'axe de translation en x du robot par la SBPA.

C.2 Identification de μ_3 :

Le troisième test correspond à la mesure de b en contrôlant seulement le mouvement de rotation du robot en injectant le même signal à l'entrée (SBPA). Ceci nous permet d'identifier le paramètre μ_3 . Nous avons identifié la fonction de transfert suivante :

$$G_3(p) = \frac{b(p)}{\Omega_y(p)} = e^{-3T_s p} \frac{1419}{p(1 + 0.031p)} \quad (\text{C.2})$$

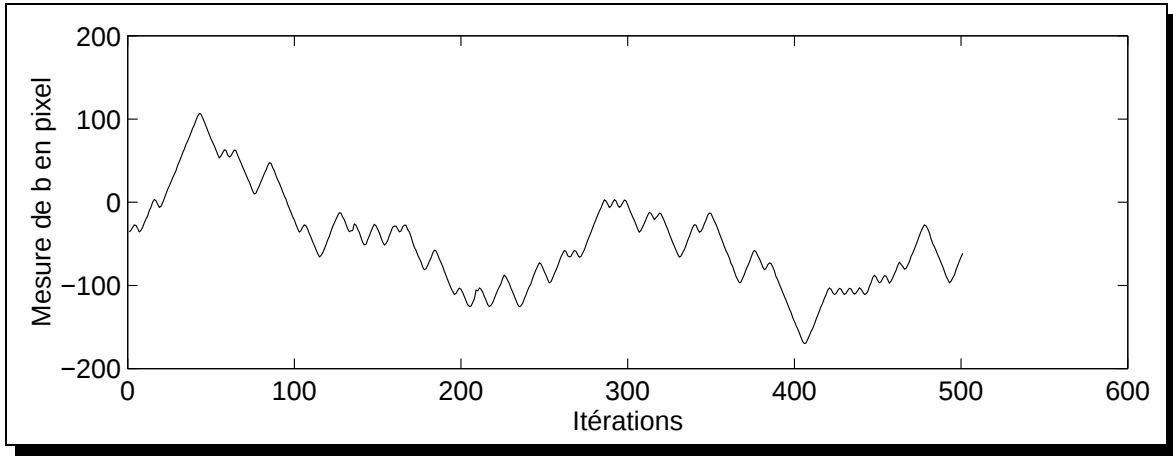


FIGURE C.2 – Identification de μ_3 - Commande de l'axe de rotation en ψ du robot par la SBPA.

Bibliographie

- [Ait-Abderahim 93] Ait-Abderahim K. – *Commandes des robots mobiles*. – INRIA Sophia-Antipolis, Thèse d'Université, Ecole des mines de Paris, Janvier 1993.
- [Alloum 94] Alloum A. – *Modélisation et commande dynamiques d'un véhicule pour la sécurité de conduite*. – Thèse d'Université, Université de Technologie de Compiègne, Mai 1994.
- [Aloimonos 87] Aloimonos J. Y., Weiss I. et Bandyopadhyay A. – Active vision. *Proc. of the first IEEE Conference on Computer Vision*, pp. 35–54. – London, 1987.
- [Ayache 89] Ayache N. – *Vision Stéréoscopique et Perception Multisensorielle, Applications à la Robotique Mobile*. – ISBN 2-7296-0264-X, 1989.
- [Bajcy 88] Bajcy R. – Active perception. *Proc. of the IEEE*, vol. 76, n° 8, August 1988, pp. 996–1005.
- [Bartels 85] Bartels M. et Fischer E. – Adams - a universal programm for the analysis of large displacement dynamics. *La dynamique des véhicules routiers. Ingénieurs de l'automobile (Paris)*, 1985, pp. 59–64.
- [Bass 65] Bass R.W. et Gura I. – High-order system design via state-space considerations. *Proc. Joint Automatic Control Conference*, June 1965, pp. 311–318. – Troy, NY.
- [Blisset 90] Blisset R.J. – Retrieving 3d information from video for robot control and surveillance. *Electronics and Communication Engineering Journal*, August 1990, pp. 155–164.
- [Boderson 74] Boderson L.S. – Optimum lateral control for dual-mode vehicles. *Proc. of the Int. Conference on Dual Mode Transportation*, p. 98. – 1974.
- [Briot 91] Briot M. et Robert-de-Saint-Vincent A. – *Intelligence Artificielle et Bon Sens*, chap. Les robots à la découverte de leur environnement, pp. 139–149. – Collection Fredrik R. Bull 10, 1991.

- [Brockett 83] Brockett R.W. – Asymptotic stability and feedback stabilization. *Progress in Math.*, Birkhauser, vol. 27, 1983, pp. 181–208.
- [Bruyelle 94] Bruyelle J.L. – *Conception et réalisation d'un dispositif de prise de vue stéréoscopique linéaire - Application à la détection d'obstacles à l'avant des véhicules routiers.* – Thèse d'Université, Université des Sciences et Techniques de Lille, Décembre 1994.
- [Buffa 93] Buffa M. – *Navigation d'un robot mobile à l'aide de la Stéréovision et de la triangulation de Delaunay.* – Nice, Thèse d'Université, Université de Nice, Décembre 1993.
- [Campion 93] Champion G., Bastin G. et d'Andrea Novel B. – Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 462–469. – Mai 1993.
- [Capurro 93] Capurro C., Panerai F., Grosso E. et Sandini G. – A binocular active vision system using space variant sensors : Exploiting autonomous behaviors for space applications. *Workshop on Computer Vision for Space Applications*, pp. 288–297. – Antibes - France, September 1993.
- [Carlson 88] Carlson S. – Information in the geometric structure of retinal flow fields. *IEEE second Int. Conf. on Computer Vision*, pp. 629–633. – Florida C.A., December 1988.
- [Chagette 77] Chagette J. – *Technique automobile, 2. Le châssis.* – Dunod, 1977.
- [Chapuis 91] Chapuis R. – *Suivi de primitives image, application à la conduite automatique sur route.* – Clermont-Ferrand, France, Thèse de l'Université Blaise Pascal, Janvier 1991.
- [Chapuis 95] Chapuis R., Potelle A., Brame J.L. et Chausse F. – Real-time vehicle trajectory supervision on the highway. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 14, n° 6, December 1995, pp. 531–542.
- [Chaumette 90] Chaumette F. – *La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques.* – Rennes, France, Thèse d'Université, IRISA/INRIA-Rennes, July 1990.
- [Christ 77] Christ H., Darenberg W., Panik F. et Weidmann W. – Automatic track control of vehicles, theory and experiment. *Proc. of the 5th VSD - 2nd IUTAM Symposium*, pp. 145–165. – Vienna, 1977.
- [Cormier 80] Cormier W.H. et Fenton R.E. – On the steering of automated vehicles - a velocity adaptive controller. *IEEE Transactions on vehicle tech.*, November 1980, pp. 375–385.

- [Crisman 91] Crisman J.D. et Webb J.A. – The warp machine navlab. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, n° 5, May 1991, pp. 451–465.
- [Crowley 92] Crowley J.L. et Reignier P. – Asynchronous control of rotation and translation for a robot vehicle. *Proc. Conf. on Robotics and Autonomous Systems*, pp. 243–251. – 1992.
- [Crowley 94] Crowley J.L. – Integration and control of reactive visual processes for visual navigation. *Proceedings of the Intelligent vehicles '94 Symposium*, pp. 32–38. – Paris - France, October 1994.
- [d'Andrea-Novel 92a] D'Andrea-Novel B., Bastin G. et Campion G. – Dynamic feedback linearization of nonholonomic wheeled mobile robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2527–2532. – Nice, France, May 1992.
- [Darenberg 78] Darenberg W. et Weidmann F. Panik W. – Design of automatic lateral vehicle controllers. *Proc. of the 7th IFAC World Congress*, pp. 2545–2550. – Helsinki, 1978.
- [David 90] David L.S., DeMenthon D., Dickinson S. et Veatch P. – Algorithm for road navigation. *Proceedings of Roundtable discussion on Vision Based Vehicle Guidance*, pp. 10.1–10.9. – Tokyo, Japan, July 1990.
- [Debain 95] Debain C., Khadraoui D., Derras M., Martinet P. et Bonton P. – A visual servoing approach to control agricultural mobile machines. *Fourth Workshop on Robotics in Agriculture and the Food-Industry*. International Advanced Robotics Programme, Toulouse-France, pp. 117–124. – October 1995.
- [Debain 96] Debain C. – *Lois de Commande pour le Contrôle et la Mobilité de Machines Agricoles..* – LASMEA, Thèse d'Université, Blaise Pascal, septembre 1996.
- [De Laplace 91] Delaplace S. – *Navigation à coût minimal d'un robot mobile dans un environnement partiellement connu.* – Paris 6, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 1991.
- [Delsatre 81] Delsatre P., Genin Y. et Kamp Y. – On the role of the nevanlinna-pick problem in circuit and system theory. *International Journal on circuit theory and applications*, vol. 9, 1981, pp. 177–187.
- [de Menthon 87] DeMenthon D. – A zero-bank algorithm for inverse perspective of a road from a single image. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 258–263. – March 1987.

- [Derras 93] Derras M. – *Segmentation non supervisée d'images texturées par champs de Markov: Application à l'automatisation de l'entretien des espaces naturels*. – Clermont-Ferrand, France, Thèse de l'Université Blaise-Pascal, Décembre 1993.
- [Deutsch 70] Deutsch C. – *Dynamiques des véhicules routiers*. – O.N.S.E.R., 1970.
- [Dickmanns 85] Dickmanns E.D. et Zapp A. – Guiding land vehicles along roadways by computer vision. *Congrès automatique*. AFCET, pp. 233–244. – Toulouse, France, October 1985.
- [Dickmanns 87] Dickmanns E.D. et Zapp A. – Autonomous high speed road vehicle guidance by computer. *10th IFAC World Congress*. – July 1987.
- [Dickmanns 88] Dickmanns E. D et Graefe V. – Applications of dynamic monocular machine vision. *Machine Vision and Applications*, No1, 1988, pp. 117–127.
- [Dickmanns 89] Dickmanns E.D. – Subject-object discrimination in 4d-dynamic scene interpretation for machine vision. *IEEE Workshop on Visual Motion*, pp. 298–304. – 1989.
- [Dickmanns 92] Dickmanns E.D. et Mysliwetz B.D. – Recursive 3d road and relative ego-state recognition. *Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence*, vol. 14, n° 2, 1992, pp. 199–213.
- [Dickmanns 93] Dickmanns E.D., Behringer R., Brudigam C., Dickmanns D., Thomanek F. et Holt V. – An all-transputer visual autobahn-autopilot/copilot. *4th ICCV*, pp. 608–615. – Berlin, Germany, May 1993.
- [Dickmanns 94] Dickmanns E.D., Behringer R., Dickmanns D., Hildebrandt T., Maurer M., Thomanek F. et Schiehlen J. – The seeing passenger car 'vamos-p'. *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*, pp. 68–73. – Paris - France, October 1994.
- [Dombre 88] Dombre Etienne et Khalil Wisama. – *Modélisation et commande des robots*. – Traité des Nouvelles Technologies, 1988, *Robotique*.
- [Dorato 92] Dorato P., Fortuna L. et Muscato G. – *Robust Control for Unstructured Perturbations- An Introduction*. – Springer-Verlag, Lectures Notes in Control and Information Sciences, 1992, Volume 168.
- [Doyle 81] Doyle J.C. et Stein G. – Multivariable feedback design: concepts for classical/modern synthesis. *IEEE Transactions Automatic Control*, vol. AC-26, 1981, pp. 4–16.

- [Canudas de Wit 96] de Wit C. Canudas, Siciliano B. et Bastin G. – *Theory of Robot Control*. – ISBN 3-540-76054-7, 1996.
- [El-Madany 90] El-Madany MM. – Ride performance potential of active fast load leveling systems. *Vehicle system dynamics*, No19, 1990, pp. 19–47.
- [Espiau 87] Espiau B. et Samson C. – Sensory based control, robustness issues and modelling technics, application to proximity sensing. *NATO Workshop on Kinematic and dynamic Issues in Sensor Based Control*. – Pisa, 1987.
- [Espiau 92] Espiau B., Chaumette F. et Rives P. – A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, No3, 1992.
- [Espiau 95] Espiau B. – *Asservissement Visuel et Commande de la Distance Focale*. – Rapport technique n° 2613, Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, Juillet 1995.
- [Fargeon 93] Fargeon C. et Quin J.F. – *Robotique Mobile*. – Sous l'égide de la D.R.E.T, 1993. 358 pages.
- [Faugeras 88] Faugeras O. D. – *A few steps towards artificial 3D vision*. – Rapport technique n° 790, INRIA, Février 1988.
- [Feddema 89a] Feddema J. T., Lee C. S. G. et Mitchell O. R. – Automatic selection of image features for visual servoing of a robot manipulator. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 832–837. – Scottsdale, Arizona, May 1989.
- [Feddema 89b] Feddema J. T. et Mitchell O. R. – Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, n° 5, October 1989, pp. 691–700.
- [Fenton 68] Fenton R.E., Cosgriff R.L., Olson K.W. et Blackwell L.M. – One approach to highway automation. *Proc. of the IEEE*, vol. 56, n° 4, 1968, pp. 556–566.
- [Fenton 76] Fenton R.E., Melocik G.C. et Olson K.W. – On the steering of automated vehicles: theory and experiment. *IEEE Transactions on automatic control*, vol. AC-21, n° 3, June 1976, pp. 306–315.
- [Fenton 88] Fenton R. et Selim I. – On the optimal design of an automatic lateral controller. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 37, n° 2, 1988, pp. 108–113.

- [Fenton 91] Fenton R.E. et Mayhan R.J. – Automated highway studies of the Ohio State University - an overview. *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 40, n° 1, February 1991, pp. 100–113.
- [Friedland 87] Friedland B. – *Control System Design - An Introduction to State-Space Methods*. – McGraw-Hill International Editions, 1987, ISBN 0-07-022441-2.
- [Fryba 87] Fryba L. – Dynamic interaction of vehicles with tracks and roads. *Vehicle system dynamics*, vol. 16, 1987, pp. 129–138.
- [Giachetti 94] Giachetti A., Campani M., Sanni R. et Succi A. – The recovery of optical flow for intelligent cruise control. *Proceedings of the Intelligent vehicles '94 Symposium*, pp. 91–96. – Pars - France, October 1994.
- [Giralt 90] Giralt G., Chatila R. et Vaisset M. – *Autonomous Robot Vehicles*, chap. An integrated navigation and motion control system for autonomous multisensory mobile robots, pp. 420–443. – Springer Verlag, 1990.
- [Grimm 94] Grimm M.M. – *Proposition d'une nouvelle méthode de transformation de signaux vidéo RVB-HSI. Application aux systèmes de vision couleur temps réel*. – Nancy, Thèse de l'Université Henry Poincaré, Nancy I, Novembre 1994.
- [Hager 96] Hager G.D., Hutchinson S. et Corke P. – *Visual Servo Control*. – IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis Hilton and Towers, Minneapolis, Minnesota, April 1996. Tutorial TT3.
- [Haralick 73] Haralick R.M., Shanmugam K. et Dinstein I. – Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, n° 6, 1973, pp. 610–621.
- [Hayafune 90] Hayafune K. et Yoshida H. – Control method of autonomous vehicle considering compatibility of riding comfort and vehicle controllability. *Automated Highway/Intelligent Vehicle Systems: Technology and Socioeconomic Aspects*, pp. 35–40. – San Diego, August 1990.
- [Heitz 93] Heitz F. et Bouthemy P. – Multimodal estimation of discontinuous optical flow using markov random field. *IEEE Transactions Pattern. Anal. Machine Intell*, vol. 15, n° 12, December 1993, pp. 1217–1232.
- [Henaff 94] Henaff P. – *Mises en œuvre de commande neuronales par rétropropagation indirecte: Applications à la robotique mobile*. – Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Juin 1994. Spécialité Robotique.

- [Herrb 91] Herrb M. – *Vision en mouvement pour la robotique mobile*. – LAAS Toulouse, Thèse de l'Université Paul Sabatier, Février 1991.
- [Hessburg 94] Hessburg T. et Tomizuka M. – Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 14, n° 4, August 1994, pp. 55–63.
- [Heraud 93] Heraud R. et Monga O. – *Vision par Ordinateur, outils fondamentaux*. – Traité des Nouvelles Technologies, série Informatique, 1993.
- [Horswill 94] Horswill Ian. – *Specialization of Perceptual Processes*. – Rapport technique n° AITR-1511, Cambridge, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (MIT), September 1994.
- [Ilic 94] Ilic M. et Masciangelo S. – Ground plane obstacle detection from optical flow anomalies : a robust and efficient implementation. *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*, pp. 333–337. – Paris - France, October 1994.
- [Ito 73] Ito T., Furumata M., Harashima F., Inaba H. et Matsumoto S. – An automatic driving system of automobiles by guidances cables. *Proc. of the International Automotive Engineering*. – Detroit, 1973.
- [Jurie 92] Jurie F., Rives P., Gallice J. et Brame J.L. – A vision based control approach to high speed automatic vehicle guidance. *IARP Workshop on Machine Vision Applications*, pp. 329–333. – December 1992.
- [Jurie 94] Jurie F., Rives P., Gallice J. et J.L.Brame. – High-speed vehicle guidance based on vision. *Control Eng. Practice*, vol. 2, n° 2, 1994, pp. 287–297.
- [Kanatani 88] Kanatani K. et DeMenthon D. – *Reconstruction of 3D road shape from images: A computational challenge*. – Rapport technique n° CS-TR-2167, Kiryu, Gunma 376, Japan, Department of Computer Science Gunma University, December 1988.
- [Khadraoui 95a] Khadraoui D., Debain C., Martinet P., Gallice J. et Berducat M. – Vision based control law for agricultural machines. *Fourth Workshop on Robotics in Agriculture & the Food-Industry*. International Advanced Robotics Programme, Toulouse-France, pp. 109–116. – October 30-31 1995.
- [Khadraoui 95b] Khadraoui D., Martinet P. et Gallice J. – Linear control of high speed vehicle in image space. *Second International Conference on Industrial Automation*. IAIA, Nancy-France, Vol. 2 pp. 517–522. – June 1995.

- [Khadraoui 96a] Khadraoui D. – Approche de commande robuste pour le contrôle latéral d'un véhicule automobile dans l'espace image. *Annales de l'université Blaise Pascal*. – Octobre 1996.
- [Khadraoui 96b] Khadraoui D., Debain C., Rouveure R., Martinet P., Bonton P. et Gallice J. – *Vision and Control in Driving Assistance of Agricultural Vehicles*. – Rapport technique, LASMEA/CEMAGREF, June 1996. A paraitre dans International Journal of Robotics Research (1998).
- [Khadraoui 96c] Khadraoui D., Motyl G., Martinet P., Gallice J. et Chaumette F. – Visual servoing in robotics scheme using a camera/laser-stripe sensor. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, n° 5, October 1996.
- [Kimura 84] Kimura H. – Robust stabilizability for a class of transfer functions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-29, n° 9, November 1984, pp. 788–793.
- [Kimura 90] Kimura Y. et Kanayama Y. – A stable tracking control method for an autonomous mobile robot. *Proc IEEE Conf on Robotics and Automation*, pp. 384–389. – Cincinnati, USA, Mai 1990.
- [Kuan 86] Kuan D., Phipps G. et Hsueh A.C. – A real time following and road junction detection vision system for autonomous vehicles. *Proc. AAAI 86*, pp. 1127–1132. – Philadelphia, August 1986.
- [Kuan 87] Kuan D. et Sharma U.K. – Model based geometric reasoning for autonomous road following. *Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 416–423. – Raleigh, NC, USA, March 1987.
- [Landau 88] Landau I.D. – *Identification et commande des systèmes*. – Hermes, Paris, 1988, *Série Automatique*.
- [Lee 93] Lee S.S., Williams J.H. et Rayment J.P. – An automatic guidance system of an autonomous vehicle - the trajectory generation and the control algorithm. *Robotica*, vol. 11, 1993, pp. 309–314.
- [Legrand 95] Legrand P. – *Schémas de parallélisation d'applications de traitement d'images sur la machine parallèle Transvision*. – Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 1995.
- [Martinet 91] Martinet P., Rives P., Fickinger P. et Borelly J.J. – Parallel architecture for visual servoing applications. *Workshop on Computer Architecture for Machine Perception*. – Paris, France, 1991.

- [Matthew 87] Matthew A. T., Morgenthaler D.G., Gremban K. et Marra M. – Video road following for the autonomous land vehicle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 273–280. – March 1987.
- [Metz 89] Metz D. et Williams D. – Near time-optimal control of racing vehicles. *Automatica*, vol. 25, n° 6, 1989, pp. 841–857.
- [Mizzi 92] Mizzi J.P. – *Méthodologie de simulation d'un essai de choc de véhicule. Conception et réalisation des outils nécessaires à sa mise en œuvre.* – Ecole centrale de Lyon, Février 1992. Doctorat en Mécanique.
- [Montagne 96] Montagne E. – *Suivi d'amers visuels dans une séquence d'images routières.* – Lasmea, Thèse de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, Février 1996.
- [Motyl 92] Motyl G. – *Couplage d'une caméra et d'un faisceau laser en commande référencée vision.* – Clermont-Ferrand, Thèse de l'Université Blaise Pascal, Septembre 1992.
- [Murphy 93] Murphy K.N., Juberts M.J., Legowik S.A. et Nashman M. – Ground vehicle control at nist: from teleoperation to autonomy. *7th Annual Workshop on Space Operations Applications and Research*, pp. 137–142. – August 1993.
- [Murphy 94] Murphy K.N. – Analysis of robotic vehicle steering and controller delay. *Robotics and manufacturing: Recent trends in Research Education and Applications- 5th International Symposium*, pp. 631–636. – August 1994.
- [Nalecz 89] Nalecz A.G. – Application of sensitivity methods to analysis and synthesis of vehicle dynamic systems. *Vehicle system dynamics*, vol. 18, 1989, pp. 1–44.
- [Niehaus 94] Niehaus A. et Stengel R.F. – Rule-based guidance for highway driving in the presence of uncertainty. *Transaction of the ASME*, vol. 116, December 1994, pp. 668–674.
- [Olson 69] Olson K.W., Sapp E.R. et Flaig T.L. – A system for automatic vehicle guidance. *Proc. of the 48th Annual Meeting*, pp. 1–11. – 1969.
- [Ozaki 90] Ozaki T., Ohzora M. et Kurahashi K. – An image processing system for autonomous vehicle. *SPIE proceedings series*, vol. 1195, 1990, pp. 256–266.
- [Pacejka 91] Pacejka H.B. et Bakker E. – The magic formula tyre model. *Proc. 1st Intern. colloque on tyre models for vehicles dynamics analysis*, pp. 1–18. – October 1991.

- [Palkovics 92] Palkovics L. – Effect of the controller parameters on the steerability of the four wheel steered car. *Vehicle system dynamics*, No21, 1992, pp. 109–128.
- [Peng 92] Peng H., Hessburg T. et Tomizuka M. – A theoretical and experimental study on vehicle lateral control. 11th *American Control Conference*, pp. 1738–1742. – June 1992.
- [Pissard-Gibollet 93] Pissard-Gibollet. – *Conception et commande par asservissement visuel d'un robot mobile*. – Thèse de l'Ecole des mines de Paris, Décembre 1993.
- [Poggio 84] Poggio T. et Torre V. – Ill-posed problems and regularization analysis in early vision. *Image understanding Workshop*, éd. par Baumann Lee S. Defence Advanced Research Projects Agency Science Applications International Corp., pp. 257–263. – October 1984.
- [Pomet 93] Pomet J.P. et Samson C. – *Time-varying Exponential Stabilization of Nonholonomic Systems in Power Form*. – Rapport technique n° 2126, INRIA, Décembre 1993.
- [Pons 94] Pons N. – *Une structure de contrôle orientée manœuvres pour un robot mobile*. – Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, Juin 1994. Spécialité Robotique.
- [Potelle 96] Potelle A. – *Reconnaissance par propagation d'informations dans une structure hiérarchique de tâches organisé par apprentissage: Application à l'interprétation de scènes routières*. – Thèse de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, 1996.
- [Raboisson 94] Raboisson S. et Achmouker: P. – Obstacle detection in highway environment by colour CCD camera and image processing prototype installed in a vehicle. *Proceeding of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*, pp. 44–49. – Paris - France, October 1994.
- [Bryne 94] Bryne H.R. et A. Chaouki. – Robust lateral control of highway vehicles. *Proceeding of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*. – Paris, France, October 1994.
- [Rives 87] Rives P. – Dynamic vision: Theoretical capabilities and practical problems. *NATO Works on Kinematic and Dynamic Issue in Sensor-Based Control*, pp. 251–280. – Pise, Italy, October 1987.
- [Rives 89] Rives P., Chaumette F. et Espiau B. – Visual servoing based on a task function approach. *First International Symposium on Experimental Robotics*. – Montréal, Canada, June 1989.

- [Rives 93] Rives P., Borrelly J.J., Gallice J. et Martinet P. – A versatile parallel architecture for vision servoing applications. *Workshop on Computer Architecture for Machine Perception*, pp. 400–409. – News Orleans, USA, January 1993.
- [Samson 90a] Samson C. – Velocity and torque feedback control of a nonholonomic cart. *Workshop in Adaptive and Non-linear Control*. – Grenoble, France, 1990.
- [Samson 90b] Samson C. et Ait-Abderahim K. – *Commande par retour d'état d'un chariot Non-holonyme dans l'espace cartésien*. – Rapport technique, INRIA, Juin 1990.
- [Samson 91a] Samson C. – *Stabilisation par retour d'état instationnaire de robots mobiles non-holonomes de type voiture*. – Rapport interne n° 1515, INRIA, Août 1991.
- [Samson 91b] Samson C., Le Borgne M. et Espiau B. – *Robot Control. The task function approach*. – Oxford, 1991, ISBN 0-19-8538057.
- [Samson 93] Samson C. – Commande de véhicules non-holonomes pour le suivi de trajectoire et la stabilisation à une posture désirée. *Proceedings colloque : Automatique pour les véhicules terrestres*, pp. 7–35. – Amiens-France, September 1993.
- [Sanderson 80] Sanderson A.C. et Weiss L. – Image based visual servo control using relational graph error signal. *Proc. of the Int. Conf. on Cybernetics and Society*, IEEE SMC, October 1980, pp. 1074–1077.
- [Sanderson 83] Sanderson A.C. et Weiss L. – *Robot Vision*. – I.F.S. Publications Ltd., 1983.
- [Sandt 93] Sandt F., Aubert D. et Festa L. – Colour vision for road scene interpretation. *International Symposium on Electronic Imaging Device Engineering, EOS/SPIE*. – June 1993.
- [Sharma 89] Sharma U.K. et Kuan D. – Real time model based geometric reasoning for vision guided navigation. *Machine vision and Applications*, vol. 2, 1989, pp. 31–44.
- [Sheikholeslam 92] Sheikholeslam S. et Desoer C.A. – Combined longitudinal and lateral control of a platoon of vehicles. *Proc. of the 1992 ACC*, pp. 1763–1767. – Chicago, 1992.
- [Shladover 78] Shladover S.E., Wormley D.W., Richardson H.H. et Fish R. – Steering controller design for automated guideway transit vehicle. *Journal of*

- Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 100, March 1978, pp. 1–8.
- [Sordalen 93] Sordalen O.J. et de Wit C. Canudas. – Exponential control law for a mobile robot. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2158–2163. – Nice, France, 1993.
- [Takanishi 88] Takanishi A. – Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion. *Proceedings of ROMANSY*. – 1988.
- [Tan 89] Tan H.S. et Tomizuka M.T. – A discrete-time robust vehicle traction controller design. *1989 American Control Conference*. – American Control Conference, June 1989.
- [Thorpe 88] Thorpe C., Hebert M.H., Kanade T. et Shafer S.A. – Vision and navigation for the carnegie mellon navlab. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, n° 3, May 1988, pp. 362–373.
- [Thorpe 90] Thorpe C.E. – *Vision and navigation*, *The Carnegie Mellon Navlab*. – Academic publishers, 1990.
- [Tournassoud 92] Tournassoud P. – *Planification et contrôle en robotique : application aux robots mobiles et manipulateurs*. – Hermes, 1992.
- [Turk 86] Turk M.A., Marra M. et Marietta M. – Color road segmentation and video obstacle detection. *SPIE*, vol. 727, 1986, pp. 136–142.
- [Turk 87] Turk M.A., Morgenthaler D.G., Gremban K.D. et Marra M. – Video road-following for the autonomous land vehicle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 273–280. – 1987.
- [Wade-Allen 86] WadeAllen R., Szostak H.T., Rosenthal T.J. et Johnston D.E. – Test methods and computer modeling for the analysis of ground vehicle handling. *SAE Technical Paper*, vol. 861115, 1986, pp. 4.592–4.611.
- [Wallace 86] Wallace R., Matsuzak K, Goto Y., Crisman J., Webb J. et Kanade T. – Progress in robot road following. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – April 1986.
- [Waxman 85] Waxman A.M., LeMoigne J. et Srinivasan B. – Visual navigation of roadways. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – April 1985.
- [Waxman 87] Waxman A.M., LeMoigne J., Davis L.S, Srinivasan B., Kushner T.R., Liang E. et Siddalingaiah T. – A visual navigation system for autonomous land vehicles. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, vol. 3, n° 2, 1987, pp. 124–141.

- [Yoshimi 95] Yoshimi B.H. et Allen P.K. – Alignment using an uncalibrated camera system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, n° 4, August 1995, pp. 516–521.
- [Zames 83] Zames G. et Francis B.R. – Feedback, minimax sensitivity, and optimal robustness. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-28, n° 5, May 1983, pp. 585–601.
- [Zworykin 58] Zworykin V.K. et Flory L. – Electronic control of motor vehicles on the highway. *Proc. of the 37th annual meeting of the Highway Research Board*. – 1958.