

N° d'ordre : 331

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

# Habilitation à Diriger des Recherches

Présentée par

Roland **LENAIN**  
Chargé de Recherche - Cemagref

*Commande de robots à dynamiques incertaines*  
*Le cas des robots mobiles tout-terrain*

Soutenue publiquement le 9 décembre 2011 devant le Jury

M. Wisama	KHALIL	Président
M. Philippe	BIDAUD	Rapporteur
M. Michel	DHOME	Rapporteur
M. Dominique	MEIZEL	Rapporteur
M. Claude	SAMSON	Examineur
M. Michel	BERDUCAT	Examineur
M. Philippe	MARTINET	Responsable tutélaire



*A mes parents*



# Résumé

La démocratisation de la robotique dans la vie de tous les jours démontre l'intérêt pour l'Homme de disposer d'entités autonomes capables de l'aider dans la vie de tous les jours. Que ce soient à des fins de production, de service, de loisir ou pour la sécurité, l'utilisation de ces systèmes permet aux personnes de faciliter ou de s'affranchir de tâches pénibles, ou plus généralement de réaliser des actions impossibles pour l'homme, soit par leur pénibilité, soit par leur dangerosité. Ces progrès ont été possibles grâce à la performance et la robustesse des systèmes développés, alliant les avancées scientifiques aux confins de plusieurs disciplines de recherche : mécanique, automatique, informatique, électronique. Si l'efficacité des robots utilisés aujourd'hui est réelle, celle-ci n'en demeure pas moins restreinte à des conditions de fonctionnement limitées. En effet, les algorithmes classiquement utilisés en robotique permettent de garantir de bonnes performances lorsque les tâches conservent un certain niveau de complexité ou s'effectuent dans des conditions d'interaction avec l'environnement bien connues et de nature constante. En revanche, dans le cadre de milieux dont les caractéristiques sont changeantes et où les dynamiques imposées au système peuvent être importantes, il est nécessaire de développer d'autres voies afin de garantir l'efficacité des solutions proposées. Il est donc nécessaire de poursuivre la recherche, notamment du point de vue de la perception et de la commande, afin de proposer des systèmes capables de s'adapter et d'intégrer des dynamiques importantes et variables.

Les travaux décrits dans ce mémoire contribuent au développement d'une approche de commande dédiée à l'asservissement de robots confrontés à de telles dynamiques. Les développements proposés sont ici appliqués à la commande de robots mobiles en milieux naturels et à relativement haute vitesse, thématique représentative de la définition de systèmes à dynamiques incertaines. La commande globale est ici envisagée dans une démarche pluridisciplinaire, reliant les aspects modélisation, observation et asservissement. Basées sur les principes de commande adaptative et prédictive, ces approches permettent de préserver la précision d'une tâche à réaliser (ici centrée sur le suivi ou la poursuite de trajectoire), vis-à-vis de la variation des conditions d'interaction entre le robot et l'environnement, ainsi que des dynamiques importantes rencontrées. Au-delà de la seule garantie de précision, cette approche est généralisée à la prise en compte de l'intégrité du robot tant physique qu'algorithmique.

Du point de vue expérimental, de nombreux essais viennent valider les développements théoriques autour de plusieurs axes : la commande des déplacements d'un robot mobile seul doté d'un ou plusieurs trains directeurs, la commande de robots mobiles poly-articulés, la commande d'une flotte de robots en formation, la commande à haute vitesse et le maintien d'intégrité (du point de vue de la stabilité physique, du respect des saturations des actionneurs ainsi que du respect de la traversabilité - notion transcendant la définition d'obstacle). Scindé en une introduction, un descriptif des différents travaux menés et un projet de recherche, ce mémoire montre les contributions des travaux au domaine de la commande de robots à dynamiques incertaines. En outre, il met en évidence les débouchés possibles d'un point de vue applicatif, en particulier pour l'environnement et l'agriculture, et ouvre des perspectives nouvelles en termes de recherche pour accroître l'autonomie et la sûreté des robots œuvrant dans des milieux complexes.

**Mots-clefs** : Robotique mobile, systèmes non-holonomes, glissement, commande adaptative et prédictive, commande non linéaire, observateurs, modélisation, robotique agricole et environnementale



## Remerciements

Ce mémoire donne corps à plusieurs années de travaux effectués au Cemagref (devenu aujourd'hui Irstea) de Clermont-Ferrand, dirigé par Anne Rizand. La nature pluridisciplinaire des travaux qui y sont présentés a été permise par la collaboration étroite avec le Lasmea, à présent agrégé dans l'Institut Pascal. Plus généralement, ces travaux s'inscrivent dans la dynamique portée par le Laboratoire d'excellence IMOBS3, dirigé par Michel Dhôme, et prolongeant la Fédération de Recherche TIMS, dont la diversité des thématiques et des personnes a été un enrichissement permanent pour mes activités. Je tiens donc en premier lieu à remercier l'ensemble des personnes dans les différents laboratoires avec qui j'ai partagé mes recherches.

Je souhaite ensuite remercier les membres de mon Jury, présidé par Wisama Khalil, qui ont eu la gentillesse d'évaluer mes travaux : Dominique Meizel et Philippe Bidaud qui ont rapporté le mémoire, ainsi que Claude Samson et Michel Dhôme pour leur lecture avisé et remarques pertinentes.

J'exprime ma profonde gratitude aux personnes qui m'ont encouragé et ont été décisives dès le début et tout au long de mon parcours et l'on fortement façonné. Philippe Martinet qui m'a enseigné, dirigé et conseillé depuis maintenant près d'une décennie et avec qui j'ai traversé de nombreuses périodes plus ou moins faciles. Michel Berducat, qui m'a toujours soutenu, encouragé et aiguillé au fil des partenariats plus ou moins heureux et des virés plus ou moins fructueuses, mais toujours dans la bonne humeur. Benoit Thuilot dont le contact quasi quotidien a été pour moi une source d'inspiration et un guide dans les chemins tortueux de la recherche scientifique. Christophe Cariou, mon "binôme", avec qui je partage le bureau (et étagères), qui a rendu ces années de travail très agréables. Nous avons de temps en temps échanger nos rôles (mais pas les bureaux). J'aimerais également remercier les personnes dont je suis sous la responsabilité : Emmanuel Hugo (responsable de l'unité TSCF), Jean-Michel Roger (animateur du Thème de Recherche Inspire) et Philippe Duchène (responsable du département écotechnologies, précédé par Gérard Chuzel), qui m'ont toujours fait confiance et mon permis de bénéficier des conditions de travail les plus favorables.

Je tiens aussi à remercier tous les doctorants que j'ai encadrés (Nicolas, Pierre D, Re-Christophe) et que j'encadre (Mathieu, Donatien, Dieumet, Pierre C), en espérant leur (avoir) apport(é)er au moins un peu de ce qu'il m'ont offert et m'offrent encore. Je voudrais aussi rendre hommage à mes collègues, dont l'énumération exhaustive doublerait la taille du mémoire, pour leur patience et leur indulgence vis-à-vis de mes invectives parfois sarcastiques.

Enfin, j'aimerais exprimer ma reconnaissance à mes proches, famille et amis, qui m'ont toujours épaulé et (ré)conforté. Je voudrais enfin envoyer mes pensées aux proches qui n'ont pu voir cet aboutissement et n'assisteront pas à la suite de cette aventure.





# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Motivations . . . . .	3
1.1.1	Demande sociétale . . . . .	3
1.1.2	Objectifs des travaux . . . . .	5
1.2	Positionnement et problématique scientifiques . . . . .	6
1.3	Contexte des travaux . . . . .	8
1.3.1	De la robotique au Cemagref . . . . .	8
1.3.2	Contexte local . . . . .	8
1.4	Contributions scientifiques . . . . .	9
1.4.1	Axe 1 : Commande des déplacements d'un robot en milieux naturels . . . . .	9
1.4.2	Axe 2 : Commande d'une flotte de véhicules en formation . . . . .	10
1.4.3	Axe 3 : Maintien d'intégrité . . . . .	11
1.5	Organisation du document . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Activités de Recherche</b>	<b>15</b>
2.1	Modélisation de robots mobiles à dynamiques incertaines . . . . .	15
2.1.1	Modélisations numériques . . . . .	16
2.1.2	Modèle cinématique . . . . .	17
2.1.3	Modélisations cinématiques alternatives . . . . .	19
2.1.4	Représentations dynamiques . . . . .	22
2.2	Observation des variables des modèles . . . . .	31
2.2.1	Observation pour de faibles dynamiques . . . . .	32
2.2.2	Observation à dynamique élevée . . . . .	33
2.2.3	Résultats liés à l'observation . . . . .	37
2.2.4	Synthèse sur les approches d'observation proposées . . . . .	44
2.3	Synthèse de lois de commande pour le déplacement . . . . .	46
2.3.1	Philosophie Générale . . . . .	46
2.3.2	Commande précise des déplacements à vitesse modérée . . . . .	48
2.3.3	Gestion de la vitesse . . . . .	62
2.4	Modération des actions de commande pour le maintien d'intégrité . . . . .	77
2.4.1	Gestion de la stabilité dynamique . . . . .	78
2.4.2	Extension à la notion de traversabilité . . . . .	82
2.4.3	Admissibilité des commandes générées . . . . .	84
2.4.4	De la modération de la vitesse . . . . .	87
2.5	Synthèse de la stratégie globale de commande . . . . .	88
2.5.1	Partie commande des déplacements . . . . .	88

2.5.2	Partie observation . . . . .	90
2.5.3	Partie maintien d'intégrité . . . . .	90
<b>3</b>	<b>De l'adaptation à la reconfiguration</b>	<b>93</b>
3.1	Problématique . . . . .	93
3.2	Généralisation de la notion d'intégrité . . . . .	95
3.3	Vers la conception mécatronique de systèmes reconfigurables . . . . .	97
3.3.1	Le cas de la robotique mobile en milieu naturel . . . . .	97
3.3.2	Généralisation . . . . .	100
3.4	Conclusion . . . . .	100
<b>A</b>	<b>Dispositifs expérimentaux</b>	<b>103</b>
A.1	Généralités . . . . .	104
A.2	Robots et véhicules utilisés pour la validation en conditions réelles . . . . .	104
A.2.1	Tracteur agricole robotisé [TR] . . . . .	104
A.2.2	Arroco . . . . .	105
A.2.3	RobuFAST [RF] . . . . .	106
A.2.4	Quad expérimental . . . . .	107
A.3	Système(s) de perception . . . . .	107
A.3.1	GPS cinématique temps réel - GPS-RTK . . . . .	108
A.3.2	Centrale d'attitude . . . . .	109
A.3.3	Module de communication sans fil . . . . .	109
A.3.4	Perception de l'environnement . . . . .	109
A.3.5	Architecture temps réel . . . . .	109
A.3.6	Synthèse des dispositifs expérimentaux en fonction des applications . . . . .	110
<b>B</b>	<b>Notice individuelle</b>	<b>111</b>
B.1	Curriculum Vitae . . . . .	111
B.2	Participation aux projets scientifiques . . . . .	113
B.3	Principales collaborations et éléments de rayonnement scientifique . . . . .	115
B.3.1	Echelle régionale . . . . .	115
B.3.2	Echelle nationale . . . . .	116
B.3.3	Échelle internationale . . . . .	116
B.3.4	Relations industrielles et société civile . . . . .	117
B.4	Animation de la communauté scientifique . . . . .	118
B.5	Activités d'encadrement . . . . .	119
B.5.1	Participations à la rédaction de projets . . . . .	122
B.6	Publications de l'auteur . . . . .	123
B.6.1	Synthèse des publications 123	
B.6.2	Liste de publications . . . . .	123

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Motivations

#### 1.1.1 Demande sociétale

##### 1.1.1.1 De l'intérêt de la robotique

Le mot robot, initié dans les années 20, prend ses racines dans les langues slaves et signifie littéralement esclave ou travailleur dévoué (robotnik en polonais). L'évolution de ce terme, se substituant au fil du temps à la notion d'automate, illustre le sens historique du développement de la robotique et de sa finalité dans nos sociétés. Aujourd'hui, un robot est appréhendé comme un système de nature pluridisciplinaire (alliant mécanique, automatique, informatique, électronique), permettant d'exécuter des tâches à la place de l'homme. Cette substitution du robot à l'homme, autorise ce dernier à s'affranchir d'activités répétitives, ennuyeuses ou dangereuses, en conservant un bon niveau de répétabilité. La robotique s'inscrit donc initialement dans la notion de progrès, laissant aux êtres humains la liberté de se consacrer pleinement à leur accomplissement. Nombre d'œuvres de science fiction ou d'anticipation depuis les années 1950 accompagnent la généralisation de l'utilisation de robots dans la vie quotidienne et mettent ainsi en scène des robots évoluant parmi les hommes, créant souvent une confusion entre êtres vivants et entités robotiques. Ces fictions mettent en évidence l'ambiguïté du sentiment que porte la société vis-à-vis des robots : si ceux-ci ont pour mission de faciliter la vie, une défiance à l'égard de leurs capacités est présente. En effet, si un robot peut remplacer l'homme pour certaines tâches, il risque de prendre définitivement sa place. Cette crainte apparaît très tôt dans l'inconscient collectif, évoqué dès 1950, notamment par l'écrivain Isaac Asimov, qui édicte *les trois lois de la robotique* :

1. Un robot ne peut porter atteinte à un être humain, ni, restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger.
2. Un robot doit obéir aux ordres que lui donne un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi.
3. Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi.

On peut s'interroger sur le fondement de cette crainte, mais la science fiction illustre cette perception ambivalente de la société vis-à-vis de la robotique. Ainsi, si son utilité est communément admise, elle doit s'accompagner de conditions pour prévenir toutes dérives et ne pas nuire aux aspirations humaines.



FIGURE 1.1 – Unimate, premier robot mis en place dans des chaînes de montage automobile

Beaucoup de domaines bénéficient de l'essor de la robotique, qui s'est en premier lieu implantée dans les chaînes de production à partir des années 1960, principalement dans le milieu de la production automobile (voir figure 1.1, présentant le premier robot intégré dans l'industrie pour la production). Depuis, de nombreux autres robots ont été développés et leur emploi s'est considérablement étendu dans les activités de production. Celles-ci restent aujourd'hui les principales utilisatrices de robots, compte-tenu du nombre important de tâches répétitives et pénibles qu'elles nécessitent.

Toutefois, les robots ne restent pas cantonnés aux ateliers de production et de nos jours, nombre d'entre eux ont vocation à être utilisés par le grand public pour aider l'homme au quotidien. Que ce soit pour l'aide aux tâches ménagères (Roomba d'iRobot), pour les transports (Google car) ou les loisirs (AIBO de Sony), il existe de plus en plus d'exemples de commercialisation, démontrant l'intérêt du grand public. La robotique se décompose alors en champs d'application et on parle notamment de robotique industrielle [col11], médicale [Gui98], humanoïde [HHK<sup>+</sup>09], mobile [col01] ou encore agricole et environnementale [BSWR05]... Ces champs d'application n'ont pas le même degré d'aboutissement dans les systèmes proposés. Ces différences s'expliquent par le degré de complexité de l'objectif à réaliser et de l'interaction avec l'environnement. Ainsi, les principes développés dans le cadre d'applications simples et dans un milieu structuré et connu rendent très efficace l'emploi de robots. Dans le cadre de milieux dont les caractéristiques sont changeantes et où les dynamiques imposées au système peuvent être importantes, il est nécessaire de développer d'autres algorithmes afin de garantir l'efficacité. Pour un tel contexte, la mise sur le marché de solutions pertinentes nécessite donc encore des avancées au niveau de la recherche. Celles-ci permettront de lever des verrous scientifiques, notamment au niveau de la perception et de la commande, afin de proposer des robots efficaces.

### 1.1.1.2 Le cas particulier de l'agriculture et de l'environnement

Comme il sera détaillé par la suite, la robotique environnementale et agricole constitue un champs d'application privilégié dans le cadre des travaux réalisés. Celui-ci se révèle représentatif d'un contexte pour lequel les machines et robots sont confrontés à une variabilité importante des paramètres régissant leurs dynamiques. Par conséquent, celles-ci deviennent difficiles à caractériser, rendant moins pertinent l'usage d'algorithmes classiquement utilisés en robotique. En

effet, à la différence de beaucoup d'applications en intérieur, l'évolution se fait en extérieur et qui plus est sur des milieux tout-terrain. Ainsi, les machines utilisées évoluent dans des environnements présentant de fortes variabilités (géométrie, conditions d'adhérence, ...), et les tâches qu'elles assurent sont de nature très différentes. Dans un tel contexte, quelques dispositifs d'assistance ont trouvé des débouchés à grande échelle (comme les systèmes de guidage par GPS illustrés par l'exemple de l'Autotrac de John Deere sur la figure 1.2). Leur efficacité est néanmoins limitée à des cas d'application restrictif (par exemple champs plats et suivi de ligne droite pour le guidage) et leur diffusion reste modéré.



FIGURE 1.2 – Exemple d'un système de guidage automatisé : l'Autotrac de John Deere

Pourtant, la contribution potentielle de la robotique dans ce domaine peut se révéler majeure. En effet, l'augmentation de l'exploitation des ressources naturelles liée à l'évolution démographique mondiale soulève d'importantes préoccupations quant à la durabilité des activités de l'Homme. La prise de conscience, tant à l'échelle mondiale que nationale, des limites d'accroissement des niveaux de production pose de nombreux défis, notamment en ce qui concerne les activités ayant trait à l'environnement. Ils sont particulièrement importants pour l'agriculture qui doit être capable de nourrir une population grandissante (prévision de 9 milliards d'individus en 2050), avec une exigence croissante en termes de qualité des produits et de réduction de l'impact négatif sur l'environnement [Bru03]. Aussi, le développement de robots dans ce contexte peut permettre de répondre à ces exigences de par la répétabilité sur le travail qu'ils peuvent apporter, l'évolution dans des zones dangereuses et les surfaces qu'ils peuvent couvrir grâce à un degré d'autonomie. En outre, ceux-ci peuvent œuvrer à soulager les opérateurs de tâches pénibles à effectuer et réduire les risques liés à de telles activités. L'agriculture, par exemple, est une des professions où l'accidentologie est très importante<sup>1</sup>.

### 1.1.2 Objectifs des travaux

Afin de pouvoir proposer des robots capables de répondre aux attentes sociétales- notamment dans les champs d'application cités précédemment -, il est nécessaire de proposer de nouvelles solutions capables d'appréhender les différentes situations rencontrées dans un contexte d'évolution

---

1. Source CCMSA : Caisse Centrale de la Mutualité Sociale Agricole. En France, l'Agriculture est le deuxième secteur d'activité en termes d'accidents

changeant. Ceci soulève une problématique scientifique d'envergure : l'observation et la commande de processus à dynamiques variables et incertaines. Celle-ci généralise les problématiques liées à l'évolution en milieux naturels, et plus particulièrement de l'interaction complexe entre une machine et son environnement. Si la perception constitue une des facettes de cette thématique, les travaux de recherche présentés ici sont focalisés sur la commande de systèmes présentant de telles spécificités. Ces travaux visent principalement à proposer des algorithmes de commande capables d'adapter le comportement d'un robot de façon autonome en fonction du contexte de la tâche et des variations dans les interactions avec son environnement. L'enjeu majeur est de prendre en compte la nature variable des dynamiques en présence, afin d'obtenir des lois de commande permettant de préserver les performances des robots vis-à-vis de ces fortes dynamiques, perturbant singulièrement le comportement nominal.

Dans le cadre de ce mémoire, la robotique mobile en milieu naturel constitue un champ d'application privilégié, mais non restrictif. Les méthodologies développées et les résultats obtenus dépassent largement ce cadre. La généricité de la démarche scientifique suivie permet son application à de nombreux domaines (la sécurité civile, les travaux publics ou encore la défense...).

## 1.2 Positionnement et problématique scientifiques

Les développements concernant les robots mobiles autonomes en milieux naturels se sont longtemps focalisés sur les thématiques de localisation et de franchissement à des vitesses basses voire quasi-statiques, autorisant l'emploi d'algorithmes complexes d'analyse de l'environnement. De telles architectures ont permis de concevoir des robots capables d'évoluer avec un haut degré d'autonomie décisionnelle pour l'exécution d'une tâche complexe dans un domaine géographique toutefois restreint [HCC<sup>+</sup>04]. L'extension du champ d'action et du temps d'intervention de robots terrestres autonomes constitue une part grandissante dans les thématiques de recherche sur les robots mobiles en milieux naturels, étant donné leurs importantes retombées applicatives. De telles évolutions nécessitent l'utilisation de plates-formes plus grandes, et capables d'évoluer à haute vitesse. Les développements récents concernant les robots mobiles autonomes tout-terrain à haute vitesse sont pour la plupart focalisés sur les problèmes de navigation et la commande est souvent attachée au suivi d'un élément structuré (sentier ou chemin). Le "Darpa Grand challenge" organisé outre atlantique dont un robot est présenté sur la figure 1.3 illustre cette dynamique. Le contrôle précis de telles structures ne peut se borner à une extension directe des algorithmes déjà développés dans le cadre de la robotique mobile à faible vitesse. En effet, les vitesses atteintes et les propriétés mécaniques des robots envisagés nécessitent la prise en compte de phénomènes encore peu traités dans le cadre d'un environnement naturel non structuré.

En premier lieu, dans le contexte d'évolution envisagé, un robot mobile est soumis à des dynamiques qui ne sont pas classiquement adressées. Les glissements et effets inertiels par exemple soumettent le système à des perturbations qui sont souvent négligées dans la commande de robots mobiles, soit que la précision de positionnement n'est pas considérée (en exploration par exemple [GMM02]), soit parce que les conditions d'évolution les rendent négligeables (déplacements sur route par exemple [MS01]). Quand ils sont considérés, de tels phénomènes sont généralement pris en compte de deux manières. Une première méthode est de considérer un modèle dynamique [Ed00], ce qui implique un nombre important de paramètres à identifier [IRG<sup>+</sup>04]. Ceci est peu envisageable en milieu tout-terrain compte tenu de la variabilité pa-



FIGURE 1.3 – Stanley, premier vainqueur du Darpa Grand Challenge (coupe initiée en 2004)

ramétrique. Une deuxième stratégie consiste à interpréter ces phénomènes comme des perturbations [ANCB95] qu'il convient de rejeter par des techniques de commandes robustes [MJNM08], [LW05], [CLO02]. Ce type d'approche est efficace dans une certaine mesure, car il nécessite la connaissance de bornes sur les perturbations modélisées. Par ailleurs, ces dynamiques ne sont pas explicitement prises en compte et l'efficacité des principes de commande s'en trouve limitée (comportement oscillant lié à l'utilisation d'approches conservatives).

Ensuite, l'évolution rapide sur des terrains irréguliers et variables peut nuire à l'intégrité physique du robot, soit en entraînant la rupture d'un organe mécanique par une trop forte sollicitation, soit en provoquant une situation d'instabilité (renversement ou cabrage [SKI07]), soit enfin, par la rencontre d'un obstacle infranchissable. Si le problème de l'évitement d'obstacle est abordé de façon significative dans la littérature (champs de potentiel [HKLC98], méthode courbure-vitesse [Sim96], ou encore fenêtre dynamique [FBT97]) peu de travaux concernent le maintien de la stabilité dynamique d'un robot mobile rapide, considérée dans la plupart des applications comme acquise. De nombreuses avancées en terme de contrôle de systèmes en milieux structurés (automobile, robots manipulateurs, chaînes d'assemblage) ont permis d'apporter des solutions pour l'optimisation du fonctionnement et de la sécurité dans ce contexte, mais leurs transpositions dans le cadre d'une évolution en milieu naturel est impossible directement. En effet, les variabilités des conditions d'interactions avec l'environnement, la complexité de description des phénomènes (modélisation), ainsi que les incertitudes issues des systèmes de perception rendent peu efficaces les techniques de commande classiquement utilisées.

Les approches proposées dans ce mémoire visent à prendre en compte au sein d'un algorithme générique de commande les phénomènes dynamiques cités précédemment, afin de conserver un asservissement précis de la position du robot, indépendamment de la situation, et de préserver son intégrité. Pour ce faire des principes adaptatifs et prédictifs, référencés modèles sont développés. Tout d'abord, ils permettent de modifier en temps réel les variables et paramètres des lois de commande, pour ajuster le comportement du robot aux variations des conditions extérieures. Ensuite, ils autorisent une anticipation importante des dynamiques en présence. En conséquence, les retards et temps de réponse peuvent être compensés, préservant la précision de positionnement. De plus, les risques de pertes d'intégrité (renversement, tête à queue, obstacles) peuvent

être prédits suffisamment tôt pour moduler les actions de commande et maintenir la stabilité du comportement.

## 1.3 Contexte des travaux

### 1.3.1 De la robotique au Cemagref

Les recherches décrites dans ce mémoire et réalisées au Cemagref - dans le groupement de Clermont-Ferrand - s'inscrivent dans le département scientifique Ecotechnologie, ayant pour objectif de contribuer à améliorer la prise en compte des composantes environnementales sous le regard de la technologie. Ce département se compose de plusieurs Unités de Recherche (UR), et notamment l'UR TSCF<sup>2</sup>, qui mobilise les sciences pour l'ingénieur, ainsi que les STIC<sup>3</sup> pour conduire des recherches sur les méthodes et outils pour une ingénierie des systèmes agri-environnementaux. Cette unité est décomposée en trois volets de recherches qui constituent autant d'équipes :

- Systèmes d'information communicants et agri-environnementaux (COPAIN) ;
- Matériaux et milieux (Carac'Terre) ;
- Technologies pour l'épandage, les agro-équipements, la mobilité (TEAM).

C'est au sein de cette dernière équipe que les activités dans le domaine de la robotique mobile sont principalement développées, autour des activités de perception et de commande. De nature pluridisciplinaire, les perspectives s'appliquent à la fois au niveau de la conception mécanique, du développement de système d'aide jusqu'à l'autonomie complète de machines.

Plus généralement, ces travaux s'inscrivent au sein du Thème de Recherche (TR) INSPIRE<sup>4</sup>, permettant d'élargir le spectre des recherches et retombées. Ce TR fédère les compétences de plusieurs unités autour d'un objectif général : répondre aux enjeux de gestion durable des ressources en concevant des procédés et systèmes innovants alliant progrès technologiques et qualité environnementale. Il s'agit principalement de concevoir des procédés et systèmes innovants, alliant progrès technologique et qualité environnementale. La notion de procédés et de systèmes est ici considérée dans une vision générale, en y intégrant plusieurs composantes et compétences (mécanique des fluides, évaluation environnemental, analyse de cycles de vie, mécatronique). Ceci confère au thème un point de vue global sur les activités liés à l'apport de la technologie pour l'amélioration des activités agri-environnementales.

### 1.3.2 Contexte local

Si les collaborations internes autorisent des développements pluridisciplinaires contribuant aux avancées obtenues, les partenariats étroits établis à l'échelle locale constituent un précieux creuset pour les recherches présentées dans ce mémoire. En effet, la place clermontoise est dotée de plusieurs laboratoires travaillant sur des thématiques complémentaires et se regroupant autour de la thématique générale de la robotique. Les domaines de la mécanique (LaMi<sup>5</sup>), de

---

2. Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes

3. Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

4. Innovations technologiques par les sciences de l'ingénieur au service de l'agriculture durable et de l'environnement

5. Laboratoire de Mécanique et Ingénieries



l'automatique (LASMEA<sup>6</sup>), de l'électronique et de l'informatique (LIMOS<sup>7</sup>) sont représentés. Ces laboratoires, avec l'UR TSCF sont été liés depuis 2004 par l'intermédiaire de la Fédération de Recherche Technologies de l'Information de la Mobilité et de la Sécurité (FR-TIMS CNRS n° 2856), dont l'existence s'achève au terme de l'année 2011. A cette échéance, la dynamique créée sera renforcée. D'une part, un laboratoire commun entre le LASMEA et le LaMi (l'Institut Pascal) sera créé à cette date. D'autre part, à partir de cette nouvelle entité, un Laboratoire d'Excellence (IMoBS3<sup>8</sup>) a été retenu dans le cadre de l'appel à projet "Investissement d'avenir" et verra le jour en 2012. Incluant le Cemagref, celui-ci fédérera l'ensemble des laboratoires en présence dans les domaines de la mobilité, dans une vision pluridisciplinaire, et intégrant les notions mécatroniques et robotiques. Ce regroupement formalise un travail commun mené depuis longtemps sur les aspects robotiques mobiles entre ces laboratoires, et dont la co-signature de la plupart des publications de l'auteur en est témoin.

## 1.4 Contributions scientifiques

Le cœur théorique des recherches décrit dans ce mémoire se focalise sur le développement d'une stratégie globale de commande pour adresser la thématique de l'asservissement de systèmes soumis à des dynamiques incertaines. Pour ce faire, plusieurs contributions dans des domaines pluridisciplinaires, notamment au niveau de la modélisation, de l'observation et de la commande ont été réalisées. Si ce mémoire est organisé autour de ce triptyque (permettant de comprendre la logique scientifique, voir section 1.5), les contributions scientifiques des travaux sont articulées dans ce chapitre autour de la notion d'axes de recherche. Cette décomposition est représentative des différentes finalités des développements. En outre elle permet d'appréhender plus finement l'interaction entre les activités de l'auteur (projets, encadrements, ...), explicitées au chapitre B. Trois axes principaux sont ici déclinés.

### 1.4.1 Axe 1 : Commande des déplacements d'un robot en milieux naturels

Les développements théoriques détaillés au chapitre 2 autour des principes de commande proposés ont montré tout leur pertinence pour l'asservissement précis d'un robot (par rapport à une trajectoire) dans un contexte difficile. En effet, les travaux réalisés dans la continuité des travaux de thèse tout d'abord (voir [CIa1-8]) ont débouché sur l'implémentation des lois de commande sur plusieurs types de véhicules et robots. Bien que les plateformes présentées en annexe A soient mises en œuvre dans des projets différents, les lois de commande concernant le suivi autonome de trajectoire ont été testées sur chacune d'elle. La grande variabilité dans les caractéristiques des robots considérés (voir annexe A) dénote de la généricité de l'approche proposée. Malgré des propriétés physiques radicalement différentes, les résultats mettent en évidence une bonne homogénéité des performances obtenues, du moins à vitesse modérée<sup>9</sup>.

---

6. Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique, et d'automatique

7. Laboratoire Informatique, Modélisation et Optimisation des Systèmes

8. Mobilité Innovante : Solutions intelligentes et durables

9. Ici, la notion basse ou haute de vitesse se comprend en fonction des caractéristiques des robots considérés et du terrain d'évolution. Les dynamiques mis en évidences sur ces robots (renversement, tête à queue, ...) se retrouvent à plus grande vitesse sur des véhicules plus imposants. Dans la suite du propos, la limite entre basses et hautes vitesses est définie autour de 4m/s.

En effet, à des vitesses importantes, les limitations mécaniques et les fortes dynamiques n'autorisent plus l'emploi de modélisations cinématiques seules. Celles-ci, uniquement capables de représenter des phénomènes relativement lents, entraînent à plus haute vitesse des oscillations, voire des instabilités. Ces phénomènes, mis en évidence dans le cadre du projet FAST [P2], ont entraîné la recherche de nouvelles approches, dédiées aux mouvements rapides et incertains. Afin de pouvoir caractériser le comportement d'un mobile à haute vitesse, une représentation hybride multi-modèles (construite par l'intermédiaire d'une approche en cascade) a été mise en œuvre. Elle permet de rendre la commande des déplacements plus réactive (voir notamment [Cia24] et [RIb3]). Cette approche originale permet actuellement de conserver la stabilité du suivi à haute vitesse avec une précision importante.

Le positionnement relatif à la trajectoire n'est pas seul à être considéré dans le cadre du contrôle des déplacements. L'exploitation de plusieurs trains directeurs permet également de réguler l'orientation du véhicule relativement à une trajectoire, afin, par exemple d'optimiser le fonctionnement d'un outil traîné, ou de limiter le tassement des sols (passage du train arrière déporté par rapport au train avant). Le contrôle indépendant de la position et de l'orientation a été étudié dans le cadre de la thèse de Christophe Cariou [T3] par l'intermédiaire d'une commande adaptative en cascade (voir [Cia13] et [CIb4]). Moyennant un réglage coordonné entre les lois de commande gérant le train avant et le train arrière, le résultat original de cette approche réside dans un contrôle indépendant entre position et orientation d'un robot mobile [RIb2]. Au-delà de l'orientation, ces lois de commande en cascade s'étendent également à la régulation de positionnement d'un outil (remorque) en y intégrant, comme précédemment, les conditions d'adhérence. En effet le contrôle d'un outil tracté peut être appréhendé, du point de vue de l'automatique, comme une mobilité supplémentaire au même titre qu'un deuxième train directeur (voir [CIa21]). Enfin, en parallèle du contrôle latéral, le contrôle longitudinal (i.e. en vitesse) a été mis en place, afin, en particulier, de pouvoir annuler et inverser la vitesse pour réaliser des opérations de demi-tour (voir [CIa19], et [CIb5]).

### 1.4.2 Axe 2 : Commande d'une flotte de véhicules en formation

Si les résultats concernant la commande d'un engin seul ont montré des avancées importantes, les principes de commande mis en place peuvent être étendus à l'asservissement synchronisé de plusieurs entités. Il s'agit ici de faire évoluer plusieurs engins de taille moyenne en formation (constante ou variable) comme le montre l'illustration de la figure 1.4, afin de pallier aux inconvénients liés à l'utilisation d'une machine seule (encombrement, tassement de sol...). Dans ce cadre, les lois de commandes dédiées au déplacement d'un engin ont été généralisées pour autoriser un asservissement relatif à d'autres entités par l'intermédiaire d'une communication sans fil. L'algorithme développé permet, en se référant à une trajectoire définie à partir des positions successives d'un véhicule leader (potentiellement conduit manuellement), d'asservir en distance longitudinale et latérale les autres robots formant la flotte. Des premiers résultats (initiés dans le cadre de stages d'élève ingénieur et valorisés notamment dans [CIa20] à vitesse réduite en utilisant une flotte communicante du LASMEA) ont montré la faisabilité et la pertinence des recherches réalisées. La prise en compte des conditions d'adhérence est réalisée de façon implicite grâce à la généralité de la théorie développée pour la commande d'un robot. Ainsi

les travaux de recherche menés dans le cadre de la thèse de Pierre Cartade [T5] ont d'ores et déjà montré la pertinence des approches dans le cadre tout-terrain. De plus, cette thèse vise à gérer de façon générique une flotte de robots à partir de la commande des déplacements. Ce travail est également mené dans le cadre des projets SafePlatoon [P3] et Baudet-Rob [P1].



FIGURE 1.4 – Exemple d'application liées à la commande en formation

### 1.4.3 Axe 3 : Maintien d'intégrité

Ce dernier axe découle naturellement des avancées réalisées dans le cadre des deux premiers axes. En effet, les résultats ont démontré de bonnes performances, mais ne garantissent pas toutefois la stabilité physique, ni la faisabilité des actions demandées aux actionneurs (intégrité du robot). Trois sens de l'intégrité sont ici déclinés.

Tout d'abord, la prise en compte de la traversabilité (le robot peut-il passer à la vitesse désirée sur la surface considérée) est adressée. Il s'agit d'analyser le terrain sur les zones d'évolution probables du mobile considéré dans le futur. Cette analyse suppose des capacités de perception de la géométrie du sol (Modèle Numérique de Terrain - MNT) par des capteurs extéroceptifs (stéréovision, laser, ou potentiellement radar). Non considérée directement dans mes travaux, la reconstruction du profil de terrain est assurée par l'intermédiaire des collaborations. Dans le cadre de l'équipe TEAM (et collaboration LASMEA), tout d'abord où la fusion de données vision et laser permet de reconstruire le profil de terrain. Dans le cadre des projets de recherche collaboratifs (notamment le projet FAST [P1], dans lequel le partenaire LAAS développe des algorithmes de construction en ligne de MNT par stéréovision). Une fois ce profil disponible, le processus de gestion de traversabilité développé dans le cadre de la thèse de Pierre Delmas [T2] consiste à générer des trajectoires d'évitement compatibles avec la dynamique du robot (i.e associées à un profil de vitesse admissible, voir [C1c12]).

La seconde composante de l'intégrité réside dans la préservation de la stabilité dynamique d'engins tout-terrain. Si celle-ci est partiellement prise en compte dans le volet précédent d'un point de vue prédictif, les capteurs requis pour la construction d'un profil de terrain sont trop onéreux pour certaines applications. Afin de considérer la stabilité dynamique avec un système de perception bas coût, les algorithmes de reconstruction ont été étendus dans le cadre de la thèse de Nicolas Bouton (Thèse [T1]) au calcul en ligne d'une métrique caractérisant le risque de renversement. Cette métrique, le transfert de charge latéral, a été appliquée à la caractérisation de la

stabilité d'engins légers tout-terrain (un quad dans les applications réelles) dans le cadre de la convention cadre Cemagref-CCMSA (voir projet [P5]). Dans un premier temps (voir [CIa10] et [CIa11]) ces travaux ont permis d'estimer en ligne, à partir de capteurs bas coût, le risque de renversement avec une précision supérieure à 10% (par comparaison avec des capteurs d'effort tournant très onéreux) et de prédire le risque probable de renversement (par extrapolation de l'état du véhicule). Un système permettant d'avertir le pilote (voir [CIa14]) d'un risque imminent a ainsi pu être mis en place afin de démontrer l'intérêt applicatif des observateurs développés (objet notamment d'une journée de démonstration le 9 décembre 2009 qui a rassemblé plus de 70 participants). Cette capacité à anticiper le risque a ensuite été mise à profit pour le limiter en agissant sur la vitesse, par l'intermédiaire d'une commande prédictive (voir [CIa18]). Ces premiers résultats très encourageants ont néanmoins été obtenus sous certaines restrictions (sol plat, position imposée du pilote) et dans le cadre du renversement latéral uniquement. L'extension et la généralisation de ces développements, initiée dans le cadre de la thèse de Mathieu Richier ([T4]) continuent par l'intermédiaire de la poursuite de la convention de recherche Cemagref-CCMSA [P5-P6]. Dans cette thèse, la mise en place de dispositifs d'assistance à la conduite sera également étudiée sous l'angle de l'acceptabilité par le conducteur et les interactions entre l'humain et l'automate. Dans le cadre d'une collaboration avec les travaux de Nicolas Tricot (UR TSAN<sup>10</sup>, TR Inspire), ces aspects seront intégrés aux travaux de recherche portant sur des points de vue plus technologiques.



FIGURE 1.5 – Machine à vendanger Grégoire G7, machine expérimentale pour le projet Acti-SurTT, dotée de mobilités internes

La philosophie générale de ces travaux (extraction d'une vitesse maximale et limitation de la vitesse appliquée) a été généralisée dans le cadre du postdoctorat d'Oliver Hach [PD1] à une troisième composante de la notion d'intégrité : le maintien de la contrôlabilité d'un véhicule et de la performance au sein du contrôle de trajectoire. Les modèles et observateurs utilisés pour la commande sont ici mis à profit pour calculer, toujours dans un sens prédictif, la vitesse menant à une perte de contrôle (tête à queue) par l'intermédiaire de la saturation des actionneurs (voir par exemple [CIa26]). Ces travaux doivent être généralisés pour garantir un écart à la trajectoire inférieur à une limite fixée. Le minimum entre vitesse désirée et vitesse calculée permet alors de garantir un comportement conforme à une exigence (contrôlabilité, précision désirée, ...).

10. Unité de Recherche Technologies pour la sécurité et les performances des agroéquipements.

Cette approche est également en cours de généralisation pour aller au-delà du simple contrôle de la vitesse d'avancement. Ainsi, la gestion différenciée des vitesses de rotation des roues (voir [Cia22]) permet d'améliorer le comportement dynamique (comme mis en évidence dans le cadre des travaux communs réalisés dans le projet FAST [P1] entre le Cemagref et l'ISIR). Les travaux de Post-Doctorat se poursuivront également dans ce sens en agissant sur d'autres mobilités d'un robot (comme des suspensions actives, ou des organes de reconfiguration). Le lien entre le maintien de stabilité et de contrôlabilité sera renforcé par la thèse de Dieumet Denis [T6] dans le cadre du Projet ANR ActiSurTT (Projet [P3] retenu par l'ANR en 2010) qui envisage une action de recherche spécifique en ce sens. Ce projet se base sur l'application viticole, qui considère des machines comportant des mobilités internes (voir illustration de la machine d'essai figure 1.5), permettant d'investir le domaine de la reconfiguration en temps réel.

## 1.5 Organisation du document

Afin de mettre en évidence la démarche scientifique mise en œuvre dans les activités de recherche, le mémoire est organisé autour de trois chapitres et deux annexes. La première annexe présente les plates formes utilisées (et les capteurs associés) pour l'étude et la validation en conditions réelles des principes proposés. La seconde annexe constitue la notice personnelle de l'auteur. Le présent chapitre introduit le cadre général des travaux, en explicitant les motivations, générales et particulières, et l'objectif global poursuivi. Il donne ensuite quelques éléments de contexte, et présente les contributions majeures en les replaçant dans le cadre des activités de recherche et d'encadrement.

Le second chapitre présente les travaux de recherche menés jusqu'ici et la démarche scientifique globale adoptée sur la commande de systèmes à dynamique incertaine. Sans perte de généralité, celle-ci est explicitée au travers de la thématique générale de la robotique mobile en milieu naturel. Afin de bien appréhender la logique des travaux et leur nature pluridisciplinaire, les activités de recherches sont articulées autour du triptyque modélisation, observation, commande. Sa description est décomposée en 5 parties. La première est logiquement focalisée sur la modélisation de robots mobiles en milieu tout-terrain, afin de se doter d'outils pertinents pour leur asservissement. Après avoir envisagé plusieurs types de modélisation, cette partie définit des systèmes de représentation "hybrides", dans le sens où ils regroupent des notions présentes dans des modélisations cinématiques et dynamiques.

La seconde partie est focalisée sur l'observation, qui permet l'alimentation des modèles décrits précédemment. Afin d'adapter le comportement du robot à son contexte d'évolution (lié à son interaction avec l'environnement), il est nécessaire de tenir compte de la nature variable de celui-ci. Cette adaptation est assurée par l'intermédiaire d'observateurs, qui autorisent l'estimation en temps réel des variables et des paramètres représentatifs des dynamiques en présence. La caractérisation fine du comportement du robot dans son environnement est ainsi rendue possible, débouchant sur de premiers résultats quant à la mise en place de dispositifs mécatroniques d'aide à la conduite. Cette partie se clos en effet sur la présentation d'algorithmes d'estimation de l'état d'un véhicule en vue d'avertir un opérateur/conducteur.

La troisième partie est focalisée sur la commande d'une tâche principale, c'est-à-dire, dans le cadre des robots mobiles en milieux naturels, l'asservissement des déplacements. Cette partie constitue le cœur des travaux et présente tout d'abord la stratégie générale de commande. En-

suite, elle s'attache à décrire les différents développements en s'appuyant sur les mobilités de celui-ci, et les thématiques abordées. Elle montre en particulier comment s'imbriquent les niveaux multiples de modélisation et stratégies d'observation au sein d'une architecture commune de commande. Les performances sont alors étudiées et les limitations, liées aux risques pour l'intégrité, sont enfin illustrées.

La notion de maintien d'intégrité et de modération des commandes générées par l'asservissement des déplacements est ensuite abordée dans une quatrième partie. En exploitant sous un autre jour, les modèles déjà utilisés, des relations entre les différentes mobilités du robot et les paramètres représentatifs de son interaction avec l'environnement sont tout d'abord construites. Les principes de commande prédictive sont alors repris sur ces relations pour déduire la vitesse maximale garantissant l'intégrité. Les hypothèses utilisées dans le cadre de l'asservissement des déplacements mettent en évidence l'indépendance (dans une certaine mesure) entre les dynamiques longitudinale et latérale. Ceci permet alors d'appliquer au robot une vitesse maximale admissible pour assurer son intégrité tout en assurant le suivi. Les résultats expérimentaux démontrent alors les potentialités offertes par ce point de vue et permettent d'envisager l'extrapolation de la notion d'intégrité, ici comprise uniquement au sens de la stabilité, de la traversabilité et du respect des saturations des actionneurs.

La cinquième et dernière partie met alors en évidence l'ensemble de la stratégie de commande dont les différentes contributions sont détaillées dans les parties précédentes. Par l'intermédiaire d'un schéma synthétique, l'interaction entre l'ensemble des développements sur la modélisation, l'observation et la commande, est ainsi mise à jour. On voit alors apparaître les multiples niveaux d'intervention sur le robot et les rôles associés, en démontrant la cohérence globale de la stratégie. Celle-ci autorise un asservissement précis pour la fonction principale (ici les déplacements en milieux incertains), tout en préservant l'intégrité du robot, considérée comme une fonction de contrainte.

A partir de ces conclusions, le troisième chapitre s'intéresse alors aux perspectives et au projet de recherche. Tout d'abord, l'extension des travaux est envisagée, notamment par la généralisation de la notion d'intégrité. Ceci met en évidence une multiplicité des lois de commande intervenant sur les actionneurs du robot. Celle-ci est traitée de façon sommaire dans la stratégie de commande générale, car ces lois n'interviennent pas en opposition. La généralisation implique en revanche de possibles contradictions nécessitant alors une sélection. Celle-ci est envisagée par la notion de reconfiguration, permettant une vision étendue du caractère adaptatif. En effet, par cet intermédiaire, la modification en ligne des lois de commande est possible. Mais la modification de la configuration du robot, par l'intermédiaire de mobilités additionnelles peut être envisagée. En conservant la philosophie générale des travaux, la synthèse des lois de modération et de maintien d'intégrité renseigne sur l'intérêt de mobilités additionnelles (influant sur la conception du robot), et sur leur commande. Le caractère adaptatif est alors transcendé par l'idée de reconfiguration. Celle-ci revêt dans la vision proposée une dimension mécatronique en prenant en compte la conception mécanique d'un système et sa commande dans un référentiel commun.

# Chapitre 2

## Activités de Recherche

### 2.1 Modélisation de robots mobiles à dynamiques incertaines

La commande d'un robot mobile en milieu naturel, et spécialement à haute vitesse, nécessite d'adresser deux principales difficultés qui rendent complexe la caractérisation du mouvement de d'un mobile. Tout d'abord, la variabilité des conditions d'interaction entre le robot et son environnement comme les conditions d'adhérence ou la géométrie du terrain influent directement sur le comportement du robot. Ces variations peuvent intervenir de manière rapide et sont difficilement prévisibles quel que soit le système de perception envisagé. Qui plus est, certaines applications font intervenir des variations des paramètres intrinsèques du robot (par exemple, la variation de la masse et de l'inertie dans des activités agricoles de type épandage) qui là encore conditionnent le comportement du robot. La deuxième difficulté principale est liée à la vitesse d'évolution des robots mobiles. En effet, à la différence des véhicules évoluant sur route, les faibles propriétés d'adhérence rencontrées en milieu naturel rendent rapidement les phénomènes dynamiques non négligeables. Que ce soit pour des phénomènes perturbant la commande (retard liés à l'inertie), ou nuisant à l'intégrité du robot (tête à queue, renversement, ...), leur influence devient non négligeable à des vitesses relativement faibles sur les robots considérés par rapport aux véhicules routiers.

La prise en compte de ces interactions spécifiques à l'évolution en milieu tout terrain pour la commande de robots est donc nécessaire pour conserver à la fois d'importants niveaux de précision, mais également l'intégrité physique du robot. Les modélisations classiquement utilisées pour la commande de robots mobiles (i.e. modèle cinématique sous hypothèse de roulement sans glissement) ne permettent pas de rendre compte de ces différents phénomènes et rendent difficilement applicables les approches classiques aux robots tout-terrain. D'autres outils de modélisation pour caractériser les phénomènes propres au contexte des travaux doivent donc être mis en place quelles que soient les approches de commandes mises en œuvre à partir de ces représentations. Plusieurs niveaux de modélisation peuvent être considérés en fonctions de leur représentativité, de l'application désirée, de la connaissance préalable nécessaire (paramètres) et du système de perception requis.



### 2.1.1 Modélisations numériques

Tout d'abord, les techniques de modélisation numérique utilisant les propriétés mécaniques d'un système pour en déduire ses mouvements, basées sur des moteurs physiques permettent un haut degré de représentativité, moyennant la connaissance fine de l'ensemble des paramètres physiques du robot et de son interaction avec l'environnement. La figure 2.1 montre deux exemples de ce type de représentation sous MSC Adams et Ogre-Physics, où l'ensemble des géométries sont programmées, ainsi que leurs propriétés physiques et les liaisons entre les corps.

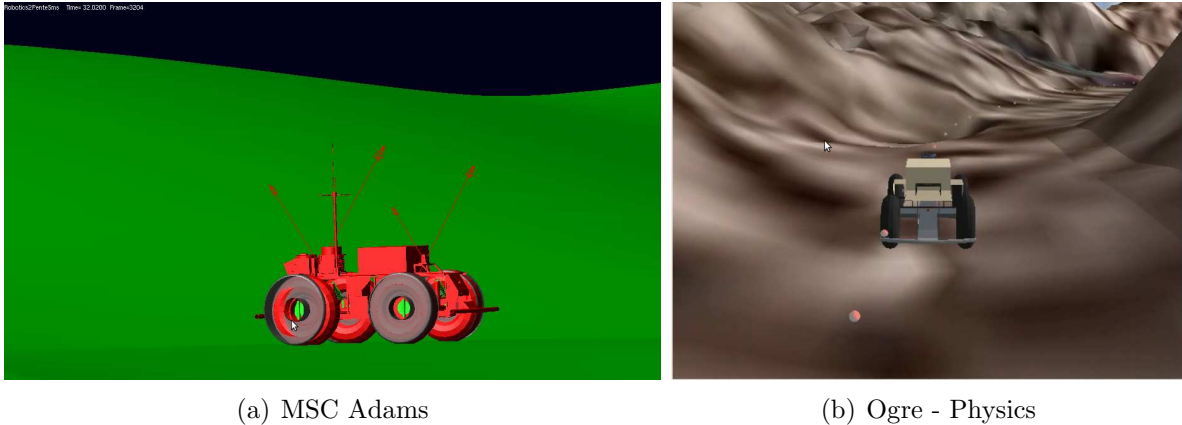


FIGURE 2.1 – Exemples de représentation numérique d'un robot mobile et de son environnement

Les commandes du robot (vitesses, angles de braquage, ...) sont ici définies comme des variables pilotant certaines des liaisons mécaniques définies au préalable. L'ensemble des variables caractéristiques de l'évolution sont ici accessibles lors du calcul des mouvements du système modélisé. Il est alors possible de définir des variables de sortie comparables à celles mesurées sur un robot réel. En conséquence, l'utilisation de moteurs physiques se révèle très utile dans le cadre de simulations, car l'ensemble des paramètres sont connus et/ou peuvent être définis, afin d'étudier leur influence de façon qualitative et quantitative sur la dynamique.

Toutefois, ce type de représentation ne permet pas d'accéder directement à des équations d'évolution nécessaires pour procéder à la synthèse de lois de commande. Par ailleurs la puissance de calcul nécessaire est bien souvent importante et ne permet, à de tels modèles, d'être utilisés en temps réel qu'à condition de restreindre leur représentativité (hypothèses simplificatrices). L'intérêt de ce type de modélisation est donc majoritairement restreint à des fins de simulation pour différents objectifs, parmi lesquels :

- conception et optimisation mécanique ;
- étude qualitative et quantitative de la dynamique ;
- test de lois de commande référencées sur d'autres modèles ;
- plans d'expérience ;
- estimation des limites de validité des modèles équationnels.

La possible utilisation en temps réel par une modélisation restreinte demeure cependant un point intéressant, dans le sens où il est possible d'anticiper sur la dynamique théorique du robot par l'intermédiaire de simulations sur un horizon restreint. Cette notion sera précisée plus avant dans le manuscrit.



### 2.1.2 Modèle cinématique

Le premier niveau de modélisation permettant de déduire des équations de mouvement afin de procéder à la commande de robots mobiles consiste à considérer uniquement les vecteurs vitesses en négligeant complètement la dynamique du robot. Ce niveau de modélisation repose essentiellement sur l'hypothèse de roulement sans glissement des roues sur le sol, permettant de connaître l'orientation des vecteurs vitesses et par suite, d'accéder aux équations du mouvement. Cette philosophie permet de déduire des modélisations pour différents types d'architecture (voir [CBAN93]). Seul le robot type  $\{2,1\}$  est considéré ici (robot mobile à trains directeurs), et est représenté comme une bicyclette, chaque train (avant et arrière) étant vu comme une roue unique dont l'angle de braquage est donné par l'épure de Jeantaud.

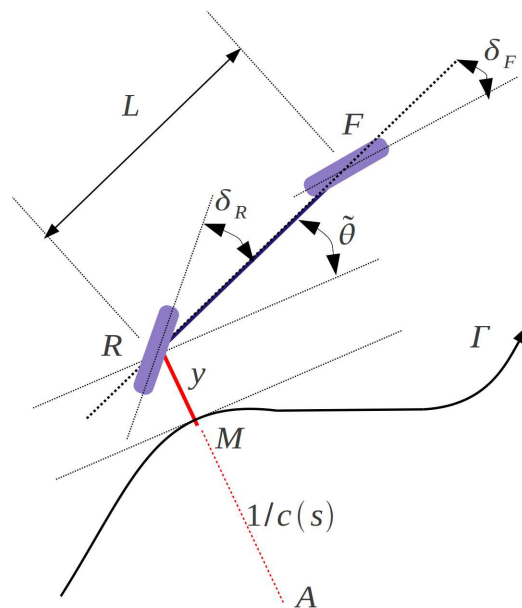


FIGURE 2.2 – Modèle cinématique d'un robot mobile à roues directrices

Cette représentation est schématisée sur la figure 2.2 dans le cadre du suivi de trajectoire. Les notations utilisées par la suite sont listées ci-après :

- $\Gamma$  est la trajectoire à suivre.
- $F$  et  $R$  sont respectivement le centre des roues virtuelles avant et arrière.  $R$  est le point à contrôler.
- $L$  est l'empattement du véhicule.
- $v$  est la vitesse linéaire du véhicule au point  $R$ , supposée strictement positive et commandée manuellement.
- $\delta_F$  et  $\delta_R$  sont les angles de braquage des roues virtuelles avant et arrière. Ils constituent les deux variables de commande.
- $M$  est le point de  $\Gamma$  le plus proche de  $R$ .  $M$  est supposé unique, voir hypothèse (2.2) ci-après.
- $s$  est l'abscisse curviligne du point  $M$  le long de  $\Gamma$ .
- $c(s)$  est la courbure de la trajectoire  $\Gamma$  au point  $M$ .
- $y$  et  $\tilde{\theta}$  sont respectivement les écarts latéral et angulaire du véhicule par rapport à  $\Gamma$ .
- $A$  est le centre de la courbure de la trajectoire au point  $M$ .

Avec ces notations et en utilisant les hypothèses précédentes le modèle cinématique décrivant les mouvements du robot est régi par le système d'équation (2.1).

$$\begin{cases} \dot{s} &= v \frac{\cos(\tilde{\theta} + \delta_R)}{1 - c(s)y} \\ \dot{y} &= v \sin(\tilde{\theta} + \delta_R) \\ \dot{\tilde{\theta}} &= v \left[ \cos(\delta_R) \frac{\tan(\delta_F) - \tan(\delta_R)}{L} - \frac{c(s) \cos(\tilde{\theta} + \delta_R)}{1 - c(s)y} \right] \end{cases} \quad (2.1)$$

Ce modèle présente une singularité lorsque  $y = \frac{1}{c(s)}$ , c'est-à-dire lorsque les points  $A$  et  $R$  sont superposés. Cette situation n'est pas rencontrée en pratique, car les rayons de courbure des trajectoires à suivre sont supposés toujours grands comparés aux écarts  $y$  à la trajectoire. Ainsi l'hypothèse suivante est posée :

$$|y| < \frac{1}{|c(s)|} \quad \Rightarrow \quad 1 - c(s)y > 0 \quad (2.2)$$

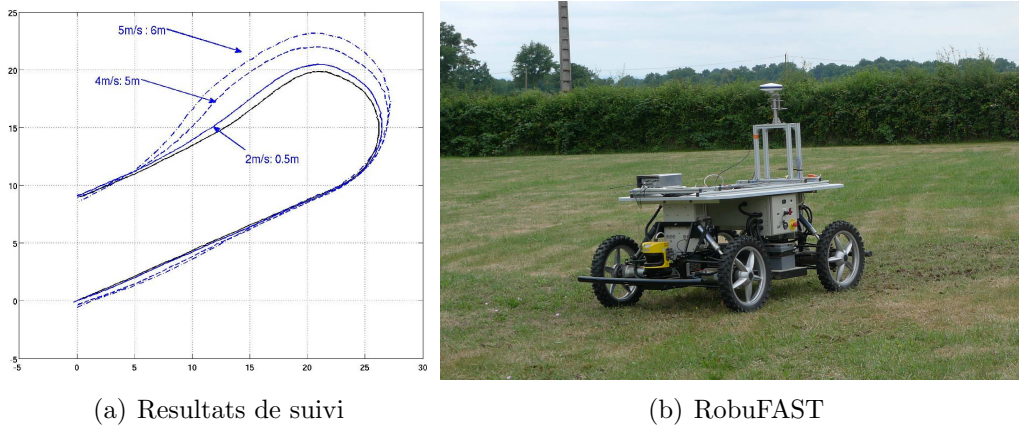
Dans ce système d'équations non linéaires, les variables de commande sont les angles de braquage ( $\delta_F$  et  $\delta_R$ ) ainsi que la vitesse linéaire  $v$  du robot. L'objectif originel du suivi de trajectoire pour ce type de robot est d'asservir l'écart latéral à 0. Comme décrit dans la suite cet objectif peut être élargi à des fins de gestion de traversabilité, stabilité et conduite en formation, ainsi que pour tenir compte des potentialités offertes par la présence de 2 trains directeurs. En tenant compte de ces points, il est possible de définir un suivi de trajectoire généralisé pour la commande des déplacements, dont les objectifs sont les suivants :

- Asservissement de l'écart latéral vers une consigne ;
- Asservissement de l'écart angulaire vers une consigne ;
- Asservissement de la vitesse.

Le modèle (2.1) présente des propriétés intéressantes du point de vue de la commande, puisqu'il peut être transformé en système chaîné (forme linéaire) par changement de variable en l'état et la commande. Ceci permet, comme réalisé dans [Sam95] et à partir des principes d'automatique linéaire, de définir une loi de commande non linéaire pour le suivi de trajectoire et dont les performances sont théoriquement indépendantes de la vitesse. De très bons résultats en simulation et sur des robots mobiles évoluant sur route et à des vitesses relativement faibles peuvent être obtenus. Ceci reste vrai tant que les hypothèses sont satisfaites (roulement sans glissement et phénomènes dynamiques négligeables).

Toutefois l'application directe au contexte tout terrain rend invalide ces hypothèses, conduisant à des résultats fortement dégradés et les propriétés d'indépendance vis-à-vis de la vitesse sont alors perdues. La figure 2.3(a) illustre cette dégradation en présentant les résultats ainsi obtenus à différentes vitesses en utilisant le robot présenté sur la figure 2.3(b). La trajectoire décrite en trait plein noir constitue la trajectoire à suivre, préalablement enregistrée à 1 m/s par un pilotage manuel sur de l'herbe (terrain d'évolution de la figure 2.3(b)).

Si pour des vitesses de l'ordre de 1m/s, la trajectoire est suivie avec un écart maximal de 20cm, les performances sont vite dégradées au-delà. En effet, à de plus hautes vitesses, les phénomènes de glissement ne sont plus négligeables et le modèle (2.1) devient de fait moins représentatif. En conséquence, les consignes de braquage envoyées ne correspondent plus aux comportement réel du robot qui enregistre alors d'importants écarts. D'autres résultats d'essais et de simulations avec d'autres robots et dans d'autres configurations (nature du sol, géométrie du terrain...) corroborent les résultats de la figure 2.3(a) et montrent la dégradation des performances des lois



(a) Résultats de suivi

(b) RobuFAST

FIGURE 2.3 – Résultats de suivi utilisant une commande basée sur le modèle cinématique classique

de commande classiques vis-à-vis des dynamiques incertaines rencontrées en milieu tout-terrain. D'autres modes de représentation associés à des lois de commandes différentes doivent donc être utilisés pour adresser les spécificités liées à la navigation en milieu tout-terrain.

### 2.1.3 Modélisations cinématiques alternatives

#### 2.1.3.1 Modélisations par perturbation de modèles

Une alternative naturelle au modèle cinématique classique permettant d'adresser les dégradations de performances observées dans les schémas de commande classiques consiste à considérer les phénomènes négligés comme des perturbations du modèle (2.1). L'objectif est alors d'utiliser la structuration de ces perturbations afin de les rejeter par l'intermédiaire de commandes robustes (voir par exemple l'utilisation de commande à mode glissant comme envisagé dans [LSXL00] ou [CLO02]). Plusieurs possibilités permettent d'introduire l'influence des dynamiques incertaines qui introduisent une violation de la non holonomie stricte du robot découlant de l'hypothèse de roulement sans glissement. Dans [ANCB95] une approche de modélisation par perturbation singulière est proposée, initialement définie pour pouvoir tester par simulation la robustesse des lois de commande utilisées en robotique mobile vis-à-vis du glissement. Concrètement, on ajoute une perturbation permettant à ce modèle de violer la condition de roulement pur, en supposant que celle-ci demeure limitée. Une loi de commande basée sur ce modèle perturbé a ensuite été proposée dans [MC00]. Dans [HCC<sup>+</sup>04], un "vecteur de dérapage", estimé en ligne et décrivant ces mouvements additionnels est utilisé pour compenser ces effets. Dans ce cas, le modèle est modifié dans le sens où un vecteur supplémentaire au vecteur d'état est utilisé.

Ce type de perturbation peut néanmoins être formalisé en vue d'être intégré dans le modèle. L'analyse du comportement des robots mobiles en milieux tout terrain montre que la violation des conditions de non holonomie peut être vue comme des perturbations ou des mouvements additionnels sur les deux axes de déplacement du modèle précédent. Ainsi, comme construit dans [LTCM03a], les modifications de la dynamique du robot peuvent être appréhendées par deux variables additionnelles représentées sur la figure 2.4 :

- Un mouvement de translation intervenant sur la dynamique d'écart latéral du robot et noté ci-après  $\dot{Y}_P$

- Un mouvement de rotation agissant sur la dynamique d'écart angulaire et noté  $\dot{\Theta}_P$

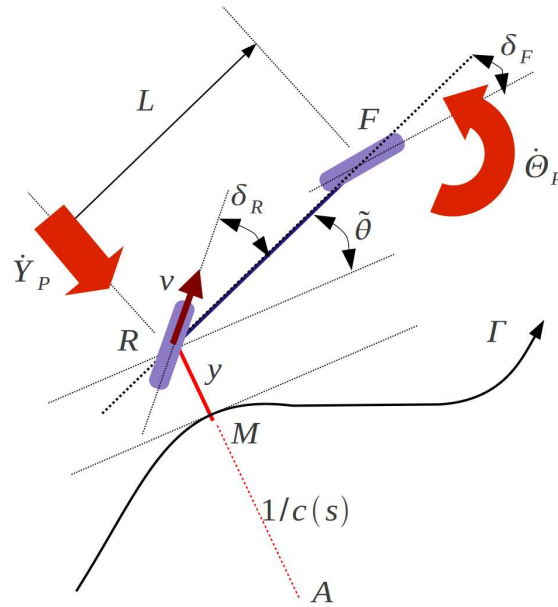


FIGURE 2.4 – Modèle cinématique perturbé

Les équations du mouvement du modèle cinématique (2.1) perturbé par les mouvements additionnels  $\dot{Y}_P$  et  $\dot{\Theta}_P$  s'écrivent alors comme (2.3)

$$\begin{cases} \dot{s} &= v \frac{\cos(\tilde{\theta} + \delta_R)}{1 - c(s)y} \\ \dot{y} &= v \sin(\tilde{\theta} + \delta_R) + \dot{Y}_P \\ \dot{\tilde{\theta}} &= v \left[ \cos(\delta_R) \frac{\tan(\delta_F) - \tan(\delta_R)}{L} - \frac{c(s) \cos(\tilde{\theta} + \delta_R)}{1 - c(s)y} \right] + \dot{\Theta}_P \end{cases} \quad (2.3)$$

Ce modèle permet de rendre compte de l'ensemble des mouvements du robot en intégrant les déplacements liés aux glissements par l'intermédiaire des variables de perturbation. En connaissant les limites de variation des variables additionnelles, il est possible de concevoir des commandes à même de rejeter ces perturbations, comme réalisé préliminairement dans [HLTM05]. Néanmoins, l'utilisation de techniques robustes sans observation préalable des mouvements liés au glissement apparaît comme trop conservatrice et amène des oscillations préjudiciables dans certaines applications. Plus récemment affinées dans [FDC<sup>+</sup>11] par l'utilisation d'une estimation préalable des variables de glissement, de telles techniques peuvent ainsi s'avérer intéressantes en complément des techniques adaptatives et prédictives défendues dans ces travaux de recherche. Bien que des techniques adaptatives aient été développées à partir de ce modèle cinématique alternatif (voir [LTCM03b]), une autre représentation basée sur le point de vue cinématique est ci-après détaillée, offrant de plus grandes potentialités, notamment compte tenu de sa compatibilité avec des représentations dynamiques, comme détaillé par la suite.

### 2.1.3.2 Modèle cinématique étendu

Afin de rendre compte de l'influence du glissement sur la cinématique d'un robot mobile, la considération des propriétés d'un modèle de comportement du pneumatique constitue un apport intéressant. En effet, le comportement du pneumatique est régi par deux variables :

- Le taux de glissement longitudinal défini par  $g = \frac{V - R\omega}{\max(V, R\omega)}$ , où  $V$  est la vitesse d'avance du centre du pneumatique,  $\omega$  la vitesse de rotation de la roue et  $R$  le rayon de celle-ci. Cette grandeur représente l'écart relatif entre la vitesse d'avance réelle et celle définie théoriquement par la rotation de la roue. Cette variable conditionne principalement l'effort longitudinal, en relation avec la dynamique longitudinale d'un véhicule.
- L'angle de dérive noté  $\beta$  dans la suite, et qui représente l'angle entre la direction théorique du vecteur de vitesse de la roue (donnée par son orientation) et la direction du vecteur vitesse réel. Cet angle est une variable majoritairement liée à l'effort latéral du pneu sur le sol et intervient donc principalement dans la dynamique latérale.

Dans le cadre du déplacement d'un robot pour le suivi de trajectoire, on s'intéresse en premier lieu à la dynamique latérale. L'angle de dérive intervenant sur l'orientation des vecteurs vitesse, celui-ci est donc naturellement compatible avec une représentation cinématique du déplacement. De plus, cet angle de dérive est directement représentatif du glissement de la roue sur le sol et permet de rendre compte de son influence sur les mouvement du robot. Compte tenu de cette considération, et en reprenant le modèle bicyclette représenté sur la figure 2.2, il est possible d'intégrer le manque d'adhérence par l'intermédiaire de deux angles de dérive.

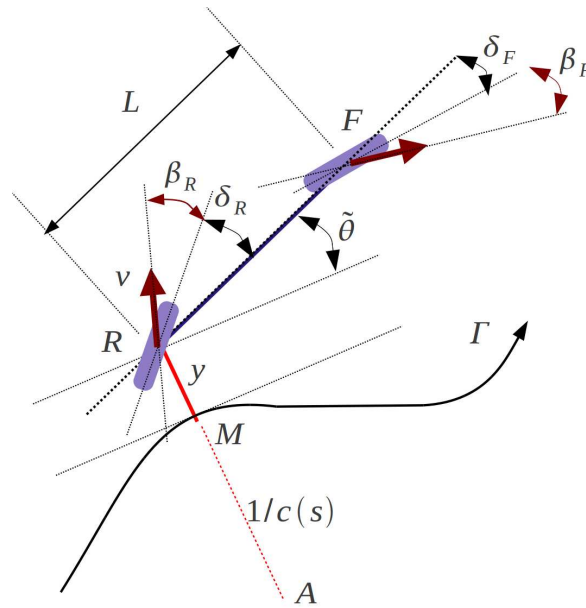


FIGURE 2.5 – Modèle cinématique étendu aux angles de dérives

La figure 2.5 illustre ainsi l'intégration de deux angles de dérives :  $\beta_F$  pour le train avant et  $\beta_R$  pour le train arrière. A partir de cette nouvelle représentation, il est possible de construire un nouveau système d'équations représentatif des déplacements du robot de la même manière que pour le cas du roulement sans glissement, en utilisant les nouvelles orientations des vecteurs vitesses. Ce calcul, détaillé dans [LTCM06], permet en le généralisant d'établir le nouveau modèle d'évolution (2.4).

$$\begin{cases} \dot{s} = v \frac{\cos(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R)}{1 - c(s)y} \\ \dot{y} = v \sin(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R) \\ \dot{\tilde{\theta}} = v [\cos(\delta_R + \beta_R)\lambda_1 - \lambda_2] \end{cases} \quad (2.4)$$

avec :  $\lambda_1 = \frac{\tan(\delta_F - \beta_F) - \tan(\delta_R - \beta_R)}{L}$ ,  $\lambda_2 = \frac{c(s) \cos(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)}{1 - c(s)y}$

Ce modèle est particulièrement intéressant du point de vue de la commande, car il possède les mêmes propriétés de linéarisation exacte que le modèle (2.1). En effet, en effectuant le changement de variable suivant :

$$\begin{cases} \delta_{F2} &= \delta_F + \beta_F \\ \delta_{R2} &= \delta_R + \beta_R \end{cases} \quad (2.5)$$

le système d'équation s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{s} &= v \frac{\cos(\tilde{\theta}_2 + \delta_{R2})}{1 - c(s)y} \\ \dot{y} &= v \sin(\tilde{\theta} + \delta_R) \\ \dot{\tilde{\theta}} &= v \left[ \cos(\delta_{R2}) \frac{\tan(\delta_{F2}) - \tan(\delta_{R2})}{L} - \frac{c(s) \cos(\tilde{\theta} + \delta_{R2})}{1 - c(s)y} \right] \end{cases} \quad (2.6)$$

qui est analogue au système d'équation (2.1) en intégrant les angles de dérive aux nouveaux angles de braquage étendus aux angles de dérive  $\beta_F$  et  $\beta_R$ . Ainsi le modèle proposé existe sous la même condition que précédemment ( $|y| < \frac{1}{|c(s)|}$ ) et nécessite là encore la connaissance d'un unique paramètre (l'empattement  $L$ ). Il permet en outre d'être représentatif de l'évolution sous faible condition d'adhérence, dès lors que les angles de dérives sont connus. L'estimation de ces deux variables  $\beta_F$  et  $\beta_R$  fait l'objet de la section 2.2, où il est démontré que celles-ci sont observables sans ajout de capteur.

Cette représentation est définie dans le cadre de ces travaux sur un robot mobile type  $\{2,2\}$ , mais elle est généralisée dans [WL07] aux différentes classes de robot définies dans [CBAN93]. Comme il est démontré par la suite, l'utilisation d'un tel modèle permet de préserver la précision d'un suivi de trajectoire pour un robot mobile évoluant en milieu naturel. La prise en compte des phénomènes de glissement est donc assurée, mais les phénomènes dynamiques demeurent négligés. Ainsi, deux limitations en découlent. D'une part, l'observation des angles de dérive basée sur ce modèle souffre d'un manque de réactivité à haute vitesse. D'autre part, ce modèle ne peut rendre compte de certains comportements induits par la haute vitesse comme les phases transitoires inertielles (menant par exemple aux têtes à queue) ou les mouvement tri-dimensionnels, notamment le renversement qui risque de se produire dans le contexte des travaux. Ce modèle est donc très pertinent pour la synthèse de lois de commande de déplacement, mais demeure néanmoins limité pour l'observation à haute vitesse, et surtout pour le maintien d'intégrité, puisqu'il ne peut caractériser la stabilité physique du véhicule. Il est donc nécessaire de tirer parti de représentations plus complètes pour adresser ces thématiques.

### 2.1.4 Représentations dynamiques

De manière générale, les modèles dynamiques de systèmes mécaniques permettent de dériver les relations existantes entre les efforts extérieurs et les accélérations des mobilités. De fait, elles permettent de prendre en considération des mouvements qui ne peuvent être représentés par la seule étude des vitesses (modèles cinématiques). Toutefois, ils requièrent la connaissance de nombreux paramètres physiques intervenant dans les relations entre efforts et accélérations (masses, inerties, position des centres de gravité des différents corps constituant le système).

### 2.1.4.1 Généralités sur les modèles dynamiques

Dans le cadre de la dynamique du véhicule en général et des robots mobiles en particulier de nombreux modèles dynamiques ont été calculés dans la littérature, en fonction de la conception, des degrés de mobilité, et de l'application souhaitée. Une multitude de modèles, avec des degrés de complexité variables, peut ainsi être dérivée en fonction du nombre de degrés de liberté et de corps considérés dans la représentation de ces systèmes. Des modèles très complets sont en particulier disponibles pour les véhicules automobiles, compte tenu de leur intérêt pour l'industrie (voir par exemple [Pha86] pour un modèle dynamique 3D complet, et [Gil92] ou [DFMZ02] pour une revue des différents types de modèles). Néanmoins, plus les représentations sont complètes et précises plus elles nécessitent la connaissance fine du système physique et donc l'estimation de nombreux paramètres [Ven03]. De plus ces paramètres se révèlent variables dans le cadre de l'évolution en milieu naturel [BAB95] (notamment en raison du contact roue/sol évoqué plus avant en section 2.1.4.3). Ainsi, en fonction des phénomènes devant être pris en compte et du contexte applicatif, différents degrés de modélisation peuvent être recensés.

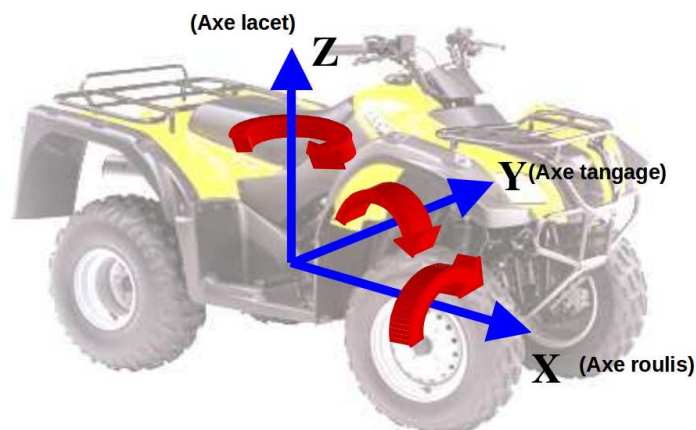


FIGURE 2.6 – Illustration des axes principaux d'un véhicule

On distingue ainsi des modèles propres aux axes principaux d'évolution représentés sur la figure 2.6. En ce qui concerne les déplacements d'un robot mobile, on considère principalement les modèles dans le plan de lacet (autour de l'axe Z), qui permettent de définir ses mouvements en considérant souvent des surfaces planes.

### 2.1.4.2 Modèle dynamique multi-plan

Afin de tenir compte des effets dynamiques à haute vitesse pour la commande des déplacements, ainsi que de la dimension spatiale du mouvement, permettant de considérer les risques de renversement, un modèle dynamique pour la commande est construit. Dans le souci de limiter le nombre de paramètres nécessaires, une vision multi-modèles est privilégiée. Comme présenté sur la figure 2.6, un modèle dans chacun des plans utiles au développement des algorithmes est ici considéré : le plan de lacet (déplacement du robot) et le plan de roulis (définissant les mouvements risquant de mener au renversement). Cette représentation est schématisée par la figure 2.7 et est basée sur les hypothèses suivantes.



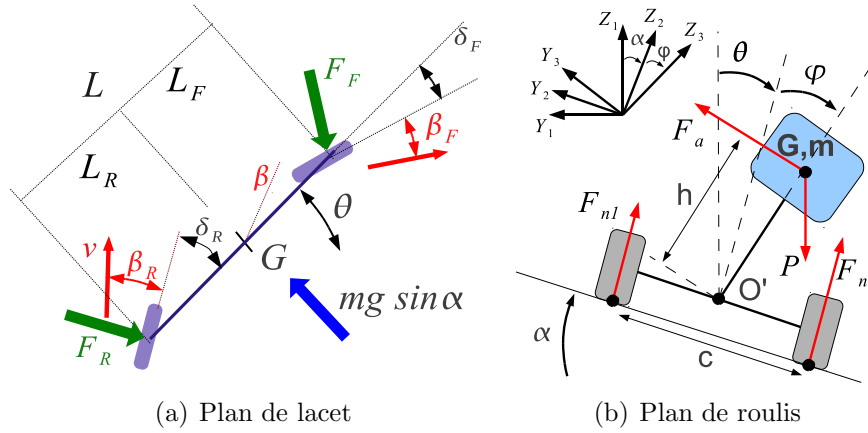


FIGURE 2.7 – Schéma des modèles dynamique utilisé

**Plan de lacet** En ce qui concerne les déplacements du robot (plan de lacet, figure 2.7(a)), le mobile est toujours vu comme un bicycle où chacune des roues représente un train (avant/arrière). Ainsi, seuls deux efforts de contact sont considérés :  $F_F$  et  $F_R$ , respectivement pour le train avant et le train arrière. De plus, afin de tenir compte de la géométrie du sol, et des effets de pente latérale (notée  $\alpha$ ), la contribution latérale de la gravité  $g$  est prise en considération, s'appliquant au centre de gravité  $G$ . En dehors de cette influence de la pente latérale, les autres mouvements de roulis (notamment l'inclinaison relative de la masse suspendue par rapport au sol) sont négligés. Enfin, les efforts longitudinaux ne sont pas pris en compte, la dynamique latérale étant supposée prépondérante par rapport à la dynamique longitudinale. En plus de ces efforts, la représentation dynamique dans le plan de lacet nécessite l'introduction des notations suivantes :

- $\beta$  l'angle de dérive globale du robot ;
- $L_R$  et  $L_F$  qui sont les demi-empattements respectivement arrière et avant (définissant la position longitudinale du centre de gravité) ;
- $m$ , la masse du robot ;
- $I_z$ , l'inertie autour de l'axe principal vertical (noté  $Z$  sur la figure 2.6) ;
- $v_2$ , la vitesse au centre de gravité  $G$  ;
- $\theta$ , l'angle de lacet.

Hormis la variable  $\beta$  les autres notations correspondent à des paramètres fixes du robot, déterminés par des mesures préalables ou une identification. Notons par ailleurs que les algorithmes d'observation décrits par la suite permettent de ne déterminer la valeur de ces paramètres que d'une façon approximative. Avec ces notations, les équations de déplacement du robot, reliant les accélérations et les efforts, sont les suivantes (dont le calcul est détaillé dans [LTCM10] et étendu ici à l'angle arrière et l'inclinaison de la masse non suspendue) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\theta} = \frac{1}{I_z} (-L_F F_F \cos(\delta_F) + L_R F_R \cos(\delta_R)) \\ \dot{\beta} = -\frac{1}{v_2 m} (F_F \cos(\beta - \delta_F) + F_R \cos(\beta - \delta_R)) + \frac{g \sin(\alpha)}{v_2} - \dot{\theta} \\ \beta_R = \arctan(\tan \beta - \frac{L_R \dot{\theta}}{v_2 \cos(\beta)}) - \delta_R \\ \beta_F = \arctan(\tan \beta + \frac{L_F \dot{\theta}}{v_2 \cos(\beta)}) - \delta_F \\ v_2 = \frac{v \cos(\beta_R + \delta_R)}{\cos(\beta)} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Ce modèle existe sous la condition que la vitesse est non nulle, ce qui est le cas en pratique (ce modèle n'étant utilisé que dans le cadre d'algorithmes fonctionnant à vitesse relativement



élevée). Ce modèle est exploitable pour la commande uniquement si les efforts latéraux ( $F_F$  et  $F_R$ ) peuvent être déterminés, ce qui est l'objet de la section 2.1.4.3 dans laquelle l'expression des équations dynamiques du déplacement en explicitant les efforts de contact est proposée.

**Plan de roulis** En ce qui concerne le plan de roulis (figure 2.7(b)), le mobile est considéré comme plan et constitué de deux roues (gauche et droite) toujours en contact avec le sol, reliées entre elles et en liaison pivot avec la masse suspendue. L'inclinaison de celle-ci par rapport au solide non suspendu est décrite par l'angle  $\varphi$  tandis que, comme dans le cas du plan de lacet, l'angle  $\alpha$  constitue l'inclinaison de la masse non suspendue par rapport au plan horizontal. Comme la dynamique de lacet est entièrement prise en compte par la représentation précédente, les efforts latéraux ne sont pas pris en compte dans ce plan de roulis. En effet, le mouvement latéral n'est pas considéré dans cette représentation. Plus précisément, les efforts extérieurs s'appliquant à ce système sont :

- $P = mg$ , la force de gravité appliquée sur la masse suspendue ;
- $F_{n1}$ , l'effort normal sur le côté gauche du véhicule ;
- $F_{n2}$ , l'effort normal sur le côté droit du véhicule ;
- $F_a$  est un effort virtuel considéré comme extérieur au système et permettant de rendre compte de l'amortissement de la suspension d'une part et des efforts latéraux des pneumatiques d'autre part. Cet effort s'applique au Centre de Gravité (CdG) de la masse suspendue. L'introduction de cette force permet de simplifier les équations d'évolution des métriques quantifiant le risque de renversement, en particulier dans l'optique de la synthèse de lois de commande pour en limiter la valeur. En effet, par l'intermédiaire de cette modélisation, les efforts normaux sont reliés à l'angle de roulis  $\varphi$  et indirectement aux variables de commande (vitesse et angle de braquage). Cette représentation reste équivalente aux descriptions plus classiques avec des efforts latéraux extérieurs au système et des efforts d'amortissement internes - [MC02], [OBA99] et [SCS06]. L'effort virtuel  $F_a$  est paramétré par  $k_r$  et  $b_r$ , représentant respectivement la raideur et l'amortissement de roulis. L'expression mathématique de cet effort est :

$$F_a = \frac{1}{h} (k_r \varphi + b_r \dot{\varphi}) \quad (2.8)$$

Les paramètres de suspensions  $h$  et  $k_r$  sont déterminés par étalonnage préalable. A partir des notations de la figure 2.7 et des hypothèses posées ci-avant, l'équation régissant le mouvement de l'inclinaison de la masse suspendue peut être déterminée à partir du principe fondamental de la dynamique en isolant la masse suspendue :

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{h} [h\dot{\gamma}^2 \varphi + h\dot{\theta}^2 \gamma + v_2 \dot{\theta} + \dot{v}_2 \beta + v_2 \dot{\beta} - \frac{k_r \varphi + b_r \dot{\varphi}}{mh} + g \sin \alpha] \quad (2.9)$$

où  $\gamma = \alpha + \varphi$  et  $\ddot{\alpha} \ll \ddot{\varphi}$ .

L'expression (2.9) fait directement intervenir l'angle de dérive global  $\beta$  ainsi que la vitesse de lacet  $\dot{\theta}$ , ce qui montre la dépendance entre les modèles de roulis et de lacet. Par ailleurs, ce modèle reste valide uniquement si les roues droites et gauches demeurent en contact avec le sol. Le décollement d'une roue (signifiant que deux roues d'un même côté du robot décollent) entraîne en effet la modification de l'inclinaison de la masse non suspendue. Dans ce cas, l'angle  $\alpha$  doit être modifié mais n'est alors plus représentatif de la géométrie du sol. Cette condition s'exprime par le fait qu'aucun des efforts normaux au contact roue sol n'est nul ( $F_{n1} \neq 0$  et

$F_{n2} \neq 0$ ). Afin de valider cette condition et pour pouvoir définir une condition de stabilité (voir section 2.1.4.4), l'ensemble du système est isolé afin de faire intervenir ces efforts normaux, dont les expressions peuvent être déduites du système (2.10),

$$\begin{cases} F_{n1} + F_{n2} &= m[-h\ddot{\gamma}\varphi - h\dot{\gamma}^2 + g - v_2\dot{\theta}\alpha] - \frac{k_r\varphi + br\dot{\varphi}}{mh}\varphi - \dot{\theta}^2\gamma\alpha + u\dot{\alpha}\beta \\ F_{n1} - F_{n2} &= \frac{z}{c}[I_x\ddot{\gamma} + (I_z - I_y)[\dot{\theta}^2\gamma] - h\sin(\varphi)(F_{n1} + F_{n2})] \end{cases} \quad (2.10)$$

en faisant l'hypothèse de petits angles.

Le système (2.10) définissant les relations entre efforts normaux au contact roue/sol fait intervenir de nouveaux paramètres :

- $c$  la voie globale du robot (moyenne des distances entre les roues gauche et droite);
- $I_x$  l'inertie autour de l'axe principal de roulis (noté  $X$  sur la figure 2.6);
- $I_y$  l'inertie autour de l'axe principal de tangage (noté  $Y$  sur la figure 2.6).

### 2.1.4.3 Modèle d'interaction roue sol

Si dans le cas des équations dynamiques du mouvement dans le plan de roulis, les efforts normaux au contact roues sol sont déterminées directement par le calcul du principe fondamental de la dynamique, le modèle de lacet nécessite la connaissance des efforts latéraux, notés  $F_F$  et  $F_R$  dans le système d'équations (2.7). Le plus célèbre des modèles de contact entre solides et permettant de déduire un effort latéral reste le modèle de Coulomb, définissant un cône d'adhérence entre effort normal et latéral lorsque l'adhérence est totale (pas de mouvement) et un cône de glissement, lorsque les deux surfaces glissent l'une par rapport à l'autre. Un coefficient (généralement noté  $\mu$ ) permet alors de trouver l'effort latéral  $F$  à l'effort normal  $F_N$ . Cette représentation est cependant peu adaptée au cas de la dynamique du véhicule, pour lequel des modèles plus fins doivent être définis. Les modèles comme celui de Dahl [Dah76], de LuGre [CdWOAL95] ou de Burckhardt/Kiencke (défini dans [KN00]) permettent notamment de faire la relation entre force de friction et la vitesse de déplacement relative des surfaces en contact. Parmi l'ensemble des modèles de pneumatiques, dont un état de l'art est disponible notamment dans [Ste04], le modèle de Pacejka, initialement présenté dans [BNP87] reste probablement le plus populaire. Plusieurs variantes ont depuis été déduites (comme par exemple [Pac02] plus proche), et se révèlent plus riches et adaptées au cas de la modélisation des déplacements d'un véhicule.

**Expression des efforts latéraux** Cette dernière représentation est pertinente dans le domaine de la dynamique du véhicule puisqu'elle relie directement les efforts latéraux à des variables présentes dans le modèle dynamique (2.7) régissant le déplacement d'un véhicule : les angles de dérive de chaque pneu ( $\beta_F$  et  $\beta_R$  dans le cas du modèle bicycle). En effet, l'expression de ce modèle montre une relation entre effort et dérive semblable à celle présentée sur la figure (2.8). Ce modèle, obtenu de façon empirique, nécessite toutefois la connaissance de nombreux paramètres (charge, pression, état du sol, sculpture des pneus, etc ...) qui influent grandement sur cette courbe. Bien que la forme globale reste semblable (zone de pseudo-glissement pour de faibles valeurs de dérive, puis saturation vers une valeur constante pour des dérives importantes), la variation des paramètres peut modifier de façon significative les valeurs atteintes par les efforts.

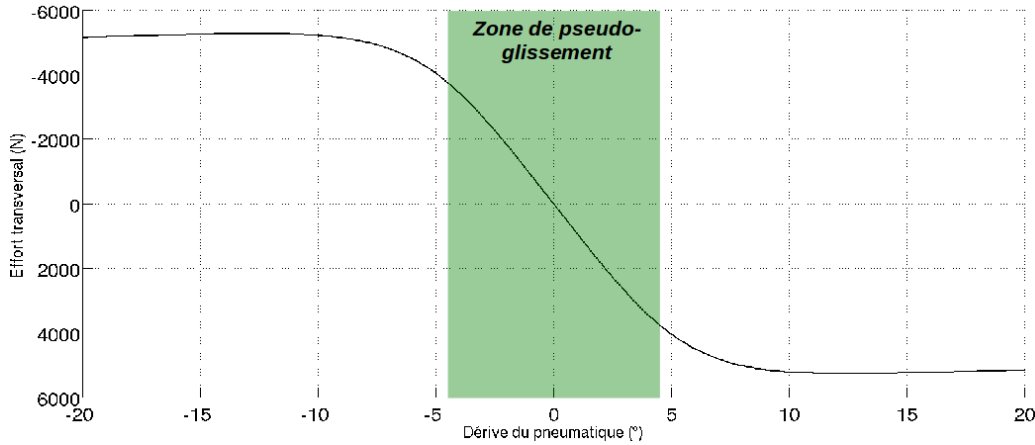


FIGURE 2.8 – Relation effort latéral - dérive dans le modèle de Pacejka

Dans le cadre d'une évolution en milieu structuré (route par exemple), ces variations demeurent limitées ainsi que les amplitudes atteintes par les angles de dérive. Aussi, l'utilisation reste limitée à la zone de pseudo-glisserment et l'hypothèse d'une relation linéaire entre force latérale et dérive est posée (le coefficient est appelé rigidité de dérive et noté  $C$ ). Toutefois, dans un contexte tout-terrain, la variation importante des conditions d'adhérence et l'ordre de grandeur pouvant être atteint par les dérives n'autorisent pas une telle hypothèse. D'une part, la zone de linéarité est bien souvent dépassée, et d'autre part, la variabilité des conditions rencontrées modifie grandement la courbe.

Afin d'éviter l'utilisation de nombreux paramètres - variables dans le contexte du milieu naturel - difficiles à identifier, qui plus est en ligne, un modèle linéaire est tout de même considéré. Toutefois, il est nécessaire pour que le modèle de contact soit représentatif, de tenir compte des non-linéarités et des variations des conditions de sol. Aussi, la rigidité de dérive pour chaque train de pneus est considérée comme variable, et dépendant de nombreuses variables devant être adaptées en temps réel pour que le modèle dynamique de lacet demeure représentatif. Cette adaptation est détaillée à la section 2.2.2. Dans le cas du modèle bicycle de la figure 2.7(a), deux relations linéaires sont alors considérées :

$$\begin{cases} F_F = C_F(\cdot)\beta_F \\ F_R = C_R(\cdot)\beta_R \end{cases} \quad (2.11)$$

introduisant les rigidités de dérives avant et arrière, attachées à chacun des trains du robot.

**Équations d'évolution du déplacement en intégrant le modèle de pneu** En introduisant les expressions des efforts latéraux (2.11) dans le modèle dynamique de lacet (2.7), le modèle dynamique de lacet peut alors s'écrire sous la forme (2.12), dont seules les rigidités de dérive doivent être connues pour le rendre exploitable.

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{1}{I_z} (-L_F C_F(\cdot)\beta_F \cos(\delta_F) + L_R C_R(\cdot)\beta_R \cos(\delta_R)) \\ \dot{\beta} = -\frac{1}{v_2 m} (C_F(\cdot)\beta_F \cos(\beta - \delta_F) + C_R(\cdot)\beta_R \cos(\beta - \delta_R)) + \frac{g \sin(\alpha)}{v_2} - \dot{\theta} \\ \beta_R = \arctan(\tan \beta - \frac{L_R \dot{\theta}}{v_2 \cos(\beta)}) - \delta_R \\ \beta_F = \arctan(\tan \beta + \frac{L_F \dot{\theta}}{v_2 \cos(\beta)}) - \delta_F \\ v_2 = \frac{v \cos(\beta_R + \delta_R)}{\cos(\beta)} \end{cases} \quad (2.12)$$

Le système d'équations (2.12) constitue donc, sous réserve de la connaissance et de l'adaptation des rigidités de dérive  $C_F$  et  $C_R$ , un modèle d'évolution capables de décrire de façon représentative et avec un nombre limité de paramètres la dynamique du robot. Il permet notamment de prendre en compte les effets dynamiques, la nature du sol et sa géométrie dans le plan de lacet (i.e. sur un plan tangent au point de contact des roues sur le sol - plan XY sur la figure 2.6).

#### 2.1.4.4 Expression mathématique de la métrique de renversement

Afin de pouvoir tenir compte de la stabilité du véhicule, en vue de maintenir le contact entre chaque roue et le sol, il est nécessaire de pouvoir quantifier le risque de renversement. Seul le renversement latéral est ici adressé compte tenu de sa prépondérance dans les risques d'instabilité (voir le chapitre perspectives pour la généralisation au cas de la dynamique longitudinale). Pour ce faire, plusieurs métriques ont été développées dans la littérature, faisant appel à divers principes, hypothèses et systèmes de mesure comme décrit dans [BMGD04]. La première catégorie d'indicateurs est essentiellement constituée de critères de stabilité statiques tels que le Static Stability Factor (SSF) [NHT] ou encore le Static Rollover Threshold (SRT). Ceux-ci ont la particularité de s'appuyer uniquement sur les caractéristiques géométriques du véhicule et par conséquent, requièrent peu de capteurs lors de leur évaluation. Néanmoins de tels critères ne peuvent être utilisés pour évaluer la propension au renversement de robots mobiles à dynamique élevée, puisque cette dynamique, ainsi que les conditions d'adhérence sont négligées. De fait, les critères dynamiques de stabilité paraissent plus appropriés au contexte de ces travaux. Par exemple, les approches basées sur l'évaluation du Zero Moment Point (ZMP - usuellement utilisées pour estimer la stabilité des robots humanoïdes) [SB04], [Vuk72] ou les méthodes liées à la stabilité des véhicules par l'évaluation de l'accélération latérale [SHR06], ou encore de l'énergie cinétique donnent des résultats intéressants. Cependant, la plupart de ces méthodes requière l'utilisation de nombreux capteurs (pression, effort - car ne pouvant être estimées indirectement), et se révèlent très dépendantes de la valeur choisie d'un seuil critique de renversement, difficile à régler.

Une métrique basée sur l'évaluation des efforts à partir des modèles dynamiques présentés ci-avant est donc privilégiée dans ces travaux, basée sur le Transfert de Charge Latéral (TCL).

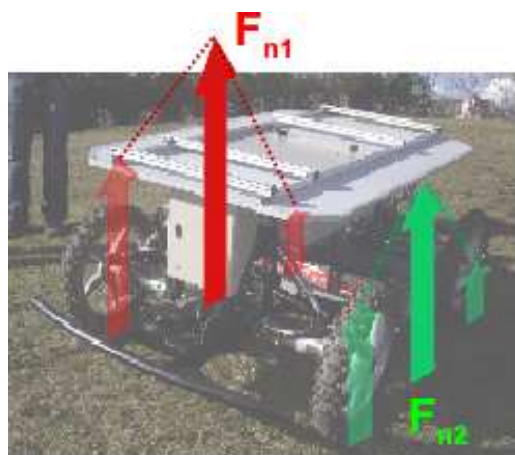


FIGURE 2.9 – Illustration des efforts pour le calcul du TCL

Cette métrique dont une illustration est donnée sur la figure 2.9, consiste à évaluer l'import-

tance relative des efforts de chaque côté d'un robot. Son expression littérale est :

$$TCL = \frac{F_{n1} - F_{n2}}{F_{n1} + F_{n2}} \quad (2.13)$$

Au vu de la définition (2.13), le TCL évolue entre -1 et 1 et permet de rendre compte de la répartition dynamique de la charge sur les roues. La valeur 0 à un équilibre complet gauche/droite alors qu'une valeur absolue unitaire signifie que les roues situées d'un coté ne sont plus en contact avec le sol (hypothèse de validité du modèle dynamique de déplacement (2.7)). Ce critère est particulièrement adapté à notre cas, puisque son évaluation est accessible par le calcul, alors que la mesure directe des efforts est difficilement envisageable. En effet, en introduisant les expressions des efforts latéraux obtenus par le modèle dynamique de roulis (2.10) dans la définition (2.13) on obtient un modèle dynamique d'évolution du TCL dont une expression simplifiée par l'hypothèse des petits angles est :

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} &= \frac{1}{h}[h\dot{\gamma}^2\varphi + h\dot{\theta}^2\gamma + v_2\dot{\theta} + v_2\dot{\beta} + v_2\dot{\beta} - \frac{k_r\varphi + b_r\dot{\varphi}}{mh} + g \sin \alpha] \\ TCL &= -\frac{2}{c}h \sin \varphi \end{cases} \quad (2.14)$$

Cette expression, associée au modèle d'évolution en lacet, permet alors de procéder à l'évaluation indirecte du risque de renversement, ainsi que d'envisager des actions de commande afin de modérer son évolution, et donc d'assurer la stabilité dynamique du robot.

#### 2.1.4.5 Synthèse des modélisations considérées

Dans cette section, plusieurs niveaux de représentation des mouvements d'un robot mobile sont proposés, afin de prendre en compte différents phénomènes et permettant d'adresser plusieurs problématiques propres à la commande de systèmes soumis à des dynamiques importantes et incertaines. L'utilisation de ces modèles en vue de la commande présente des différences sur le plan :

- des phénomènes pouvant être pris en compte ;
- de la complexité ;
- du nombre de paramètres à identifier ;
- du nombre de variables à connaître et donc du système de perception à mettre en œuvre.

Afin de bien appréhender cette relation entre phénomènes à prendre en compte et complexité de modélisation, le tableau 2.10 résume l'utilité des types de modèle vis à vis des actions de commande envisagées. Il met ainsi en évidence le mode de représentation à privilégier en fonction de l'objectif recherché pour la commande.

Naturellement, les fonctions où les effets dynamiques à prendre en compte sont les plus rapides et incertains requièrent les niveaux de représentation les plus fins, mais aussi les plus complexes. Comme il sera détaillé dans le chapitre traitant de l'observation, les modèles développés ici permettent toutefois l'utilisation de systèmes de perception restreints (exception faite de la notion de traversabilité), en exploitant la notion d'observation et en exploitant la relation existante entre ces différents modèles (tant du point de vue des variables communes, que de leur recouvrement vis-à-vis de la caractérisation des mouvements).

	Modèle cinématique pur	Modèle cinématique étendu	Modèle dynamique lacet	Modèle dynamique roulis
Déplacements basse vitesse / terrain structuré	x			
Déplacements en milieu naturel		x		
Déplacements à haute vitesse		x	x	
Gestion de stabilité			x	x
<u>Traversabilité</u>			x	x
Gestion de la Contrôlabilité			x	

FIGURE 2.10 – Relation entre type de commande et adéquation du type de modèle

## 2.2 Observation des variables des modèles

Afin d'être exploitables pour la commande, les modèles présentés doivent être alimentés. En ce qui concerne la commande des déplacements les variables nécessaires au positionnement du robot relativement à une trajectoire de référence  $\Gamma$  comme présenté sur la figure 2.2, doivent être connues. Ainsi le vecteur d'état complet permettant la synthèse de lois de commande pour un robot mobile dans l'exemple du suivi de trajectoire est défini par :

$$X_C = \begin{bmatrix} s \\ y \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

qui peut être réduit dans le cadre du suivi strict de trajectoire (i.e. contrôle des angles de braquage) aux deux dernières variables du vecteur défini par (2.15) au vecteur d'état (2.16)

$$X = \begin{bmatrix} y \\ \tilde{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Les travaux présentés ici se basent sur l'hypothèse que ce vecteur d'état est correctement mesuré et/ou estimé (par l'intermédiaire du système de perception décrit à l'annexe A), par la connaissance de la position et de l'orientation absolue du robot. Outre le vecteur d'état, on considère par la suite que certaines des variables intervenant dans les modèles dynamiques sont également connues. Il s'agit de :

- La vitesse de lacet  $\dot{\theta}$  ;
- L'angle d'inclinaison latérale de la masse non suspendue  $\alpha$ .

Comme il est détaillé dans la section 2.3 et pressenti dans la section précédente traitant de la modélisation, seul le modèle cinématique étendu (2.4) est utilisé pour la synthèse d'une loi de commande. En effet, il permet de décrire l'évolution du vecteur d'état (2.16) en prenant en compte les phénomènes de glissement par l'intermédiaire des angles de dérive  $\beta_R$  et  $\beta_F$  et donc de préserver la précision de suivi dans le cadre de l'évolution en milieu naturel. Ainsi, la représentation d'état pour le suivi de trajectoire s'écrit de la manière suivante :

$$\dot{X} = f(X, \delta_F, \delta_R) = \left\{ \begin{array}{l} v \sin(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R) \\ v \left[ \frac{\cos(\delta_R + \beta_R) [\tan(\delta_F + \beta_F) - \tan(\delta_R + \beta_R)]}{L} - \frac{c(s) \cos(\tilde{\theta}) + \delta_R + \beta_R}{1 - c(s)y} \right] \end{array} \right\} \quad (2.17)$$

Comme on peut le déduire au vu du modèle d'état (2.17), celui-ci est exploitable uniquement si les angles de dérive  $\beta_R$  et  $\beta_F$  sont connus. Il en va de même pour connaître l'évolution de la dynamique de lacet (et plus particulièrement pour connaître l'évolution du transfert de charge), régie par le modèle (2.14), pour lequel il est nécessaire de connaître la dérive globale  $\beta$ . Comme le montre le modèle d'évolution en lacet donné par le système (2.7), cet angle est intimement lié aux deux angles de dérive avant et arrière. Par ailleurs, l'exploitation des représentations dynamiques requière également la connaissance des conditions d'adhérence (rigidités de dérive  $C_F$  et  $C_R$ ) intervenant dans le modèle de lacet (2.12).

La problématique de la commande pour la navigation précise et stable de robots en milieux naturels nécessite donc la connaissance des angles de dérive. Ces angles ne peuvent être mesurés directement avec des dispositifs de perception exploitables en temps réel pour la commande. En revanche les variables représentatives des conditions de contact peuvent être estimées indirectement, afin d'exploiter les différents modèles d'évolution pour la commande. Cette estimation est

l'objet de la présente section. L'utilisation des modèles ainsi alimentés pour la synthèse de lois de commande adaptative (demeurant stable dans la plage d'évolution des variables observées) pourra alors être abordée.

## 2.2.1 Observation pour de faibles dynamiques

S'il apparaît que le modèle d'état (2.17) peut être mis sous une forme observable en ajoutant au vecteur d'état les angles de dérive (comme détaillé dans [LTCM06]), cette stratégie fait apparaître une matrice pouvant être facilement singulière, et complique le réglage des gains. Cette stratégie est donc difficilement utilisable en pratique. Pour aller plus loin, l'observation est ici basée sur la dualité entre observation et commande, en considérant les dérivées variables  $\beta_R$  et  $\beta_F$  comme des variables de commande devant faire converger l'état observé vers l'état mesuré. Pour ce faire, l'équation d'état (2.17) est réécrite sous la forme suivante :

$$\dot{X}_{obs} = f(X_{obs}, \delta, u) = \left\{ \begin{array}{l} v \sin(\tilde{\theta}_{obs} + \delta_R + u_2) \\ v \left[ \frac{\cos(\delta_R + u_2)[\tan(\delta_F + u_1) - \tan(\delta_R + u_2)]}{L} - \frac{c(s) \cos(\tilde{\theta}_{obs} + \delta_R + u_2)}{1 - c(s)y_{obs}} \right] \end{array} \right\} \quad (2.18)$$

où  $X_{obs} = (y_{obs}, \tilde{\theta}_{obs})$  est l'état observé,  $\delta = (\delta_F, \delta_R)$  représente le vecteur contenant les angles de braquage, considérés ici comme des variables mesurées et  $u = (u_1, u_2) = (\beta_F, \beta_R)$  est le vecteur de commande dont une loi doit être synthétisée pour assurer la convergence de l'état observé  $X_{obs}$  vers la mesure de ce vecteur d'état :  $X_{mes} = (y_{mes}, \tilde{\theta}_{mes})$ .

Dans le cadre de l'évolution à basse vitesse, les dérivées n'excèdent pas une dizaine de degrés en pratique. Ainsi, le modèle d'état non linéaire (2.18) est linéarisé sous la forme du modèle d'état (2.19), linéaire en la commande.

$$\dot{X}_{obs} = f(X_{obs}, \delta, 0) + B(X_{obs}, \delta)u \quad (2.19)$$

avec  $B$  représentant la dérivée partielle de  $f$  par rapport à  $u = (u_1, u_2)$ , et évaluée en  $u = (0, 0)$  :

$$B(X_{obs}, \delta) = \left[ \begin{array}{cc} 0 & v \cos(\tilde{\theta}_{obs} + \delta_R) \\ \frac{v \cos \delta_R}{L \cos^2 \delta_F} & v \frac{c(s) \sin(\tilde{\theta}_{obs} + \delta_R)}{1 - c(s)y_{obs}} - \frac{v}{L \cos \delta_R} - v \sin \delta_R \frac{\tan \delta_F - \tan \delta_R}{L} \end{array} \right] \quad (2.20)$$

La matrice  $B$  est inversible sous réserve que  $(\tilde{\theta}_{obs} + \delta_R) \neq \frac{\pi}{2}[\pi]$ ,  $v \neq 0$  et  $\delta_R \neq \frac{\pi}{2}[\pi]$ , ce qui est assuré en pratique, compte tenu de la géométrie du robot ( $|\delta_R| < 20^\circ$ ) et des conditions de suivi de trajectoire (qui suppose d'une part que le robot avance et qu'il soit physiquement capable de compenser les glissements).

Sous ces conditions, une expression pour la commande  $u$ , permettant la convergence de l'erreur d'observation  $e = X_{obs} - X_{mes}$  vers 0 est la suivante :

$$u = B(X_{obs}, \delta)^{-1} \left\{ G \cdot e - f(X_{obs}, \delta, 0) + \dot{X}_{mes} \right\} \quad (2.21)$$

En effet, en injectant l'expression (2.21) dans l'équation d'état (2.19) on obtient la dynamique suivante pour l'erreur d'observation :

$$\dot{e} = G \cdot e \quad (2.22)$$

Sous réserve que la matrice  $G$  est Hurwitz, l'équation différentielle (2.22) impose la convergence  $e \rightarrow 0$  et par voie de conséquence, la convergence de  $X_{obs}$  vers  $X_{mes}$ . La matrice  $G$  constitue



ainsi une matrice de gain permettant de régler le temps de réponse de l'erreur.

L'expression (2.21) constitue donc l'équation d'observation des angles de dérive assurant  $X_{obs} \rightarrow X_{mes}$ , et permettant donc au modèle cinématique étendu (2.4) d'être représentatif de l'évolution réelle du robot. On peut noter que toute différence entre le modèle et la mesure du comportement du robot sera compensée par une adaptation des dérivés  $\beta_F$  et  $\beta_R$ . Si la consistance du modèle est assurée, d'autres phénomènes, négligés dans le modèle cinématique, peuvent amener des différences (retard dans les mesures...). Ainsi, les angles de dérive peuvent être légèrement différents des angles réels, mais permettent au modèle (2.4) de définir les déplacements réellement mesurés du robot. En conséquence, les angles de dérive ainsi estimés en temps réel peuvent être exploités pour adapter une loi de commande reposant sur ce modèle, comme schématisé sur la figure 2.11, qui nécessite la connaissance de ces variables.

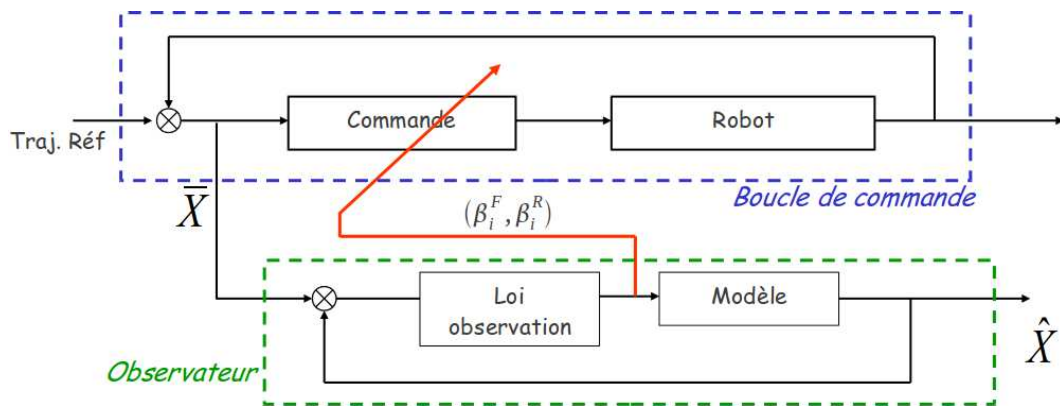


FIGURE 2.11 – Schéma de la stratégie d'observation basée sur le modèle cinématique étendu

Toutefois, un tel observateur ne prend pas en compte les lois qui régissent l'évolution des angles de dérive, décrites dans le modèle (2.12), par l'intermédiaire de l'angle de dérive global  $\beta$ . De plus, le temps de réponse, conditionné par la matrice  $G$ , introduit un filtrage des données réduisant les effets du bruit de mesure sur  $X_{mes}$ , et compatible avec l'évolution cinématique du robot. Ainsi, les effets dynamiques, en particulier liés à l'inertie du robot et la non linéarité du contact roue/sol, sont négligés. Ceci génère un retard d'estimation, qui est négligeable à basse vitesse, mais qui entraîne des phénomènes oscillatoires à haute vitesse. Enfin, la dynamique de roulis nécessite la connaissance des conditions d'adhérence ( $C_F$  et  $C_R$ ) qui ne peuvent être estimées par cette méthode. Par conséquent, cette stratégie d'observation est pertinente en milieu naturel pour estimer les angles de dérive, mais reste limitée à la commande des déplacements à basse vitesse, pour lesquels les risques de renversement dynamiques demeurent limités.

## 2.2.2 Observation à dynamique élevée

Comme évoqué précédemment, l'accroissement des vitesses d'évolution nécessite la prise en compte d'effets dynamiques. En effet, à haute vitesse, il est nécessaire de rendre l'estimation des angles de dérive plus réactive, et d'estimer les rigidités de dérive, pour alimenter les représentations dynamiques, seules capables de prendre en compte les risques d'instabilité. Au regard du modèle dynamique de lacet (2.12), il apparaît possible de définir un reconstruteur d'état (par exemple comme précédemment) en vue d'estimer l'angle de dérive globale  $\beta$  (et par

suite  $\beta_F$  et  $\beta_R$ ), sous l'hypothèse que les rigidités de dérive sont connues. Toutefois, leur estimation nécessite elle-même une mesure de  $\beta$ . Afin de résoudre ce problème, la relation entre modèle cinématique étendu et modèle dynamique de lacet est exploitée.

En effet, il apparaît que la variation des rigidités de dérives est lente vis-à-vis des variations des angles de dérive. Aussi, en vue d'adapter les rigidités, les estimations des dérives issues de l'observateur (2.21) - pas assez réactives pour la commande - sont néanmoins utilisables. La stratégie d'observation est donc décomposée en plusieurs étapes, comme décrit sur la figure 2.12.

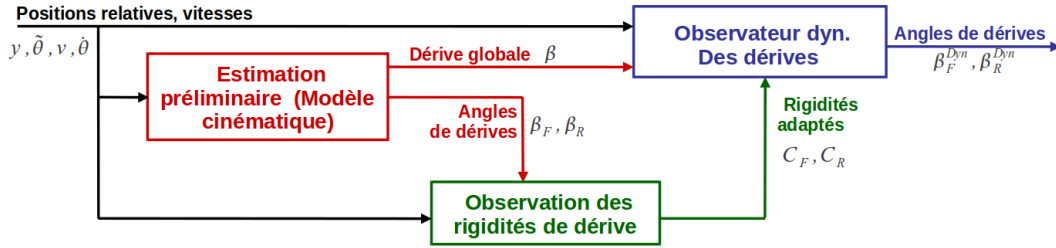


FIGURE 2.12 – Schéma de la stratégie d'observation cinématique étendu - dynamique

**Première étape** La première étape (estimation préliminaire) consiste en l'estimation des angles de dérive basée sur le modèle cinématique étendu, soit l'observateur (2.21). A partir de cette estimation préliminaire, une dérive globale est calculée par l'intermédiaire des équations 3 et 4 du système (2.12) sous l'hypothèse de petits angles, considérée par la suite comme une mesure et notée  $\bar{\beta}$  :

$$\bar{\beta} = \frac{L_R(\beta_F + \delta_F) + L_F(\beta_R + \delta_R)}{L} \quad (2.23)$$

**Deuxième étape** Dès lors qu'une mesure de l'angle de dérive globale est connue, la seconde étape peut être décrite. Il s'agit d'estimer les rigidités de dérive  $C_F$  et  $C_R$ , en considérant un autre vecteur  $X_1$ , ici représentatif des variables dynamiques :

$$X_1 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Dans [LTCM10] une estimation directe des rigidités de dérive basée sur le modèle dynamique de lacet (2.12) a été proposée. Néanmoins, cette stratégie présente une singularité en  $(\delta_F, \delta_R, \beta_F, \beta_R) = (0, 0, 0, 0)$ , ce qui correspond à une évolution en ligne droite, et nécessite de geler l'estimation en dessous de certaines valeurs de ce quadruplet. Ceci pouvant mener à une instabilité de l'estimation, une autre méthode d'estimation a été proposée dans [LTHM11] et étendue ici à la prise en compte de l'angle de roulis du châssis  $\alpha$  (inclinaison de la masse non suspendue) et à la prise en compte de l'angle de braquage arrière. Dans ce point de vue, l'évolution de  $X_1$  est définie par l'intermédiaire du modèle dynamique (2.7), et peut s'écrire après réorganisation sous la forme suivante :

$$\dot{X}_1 = A_1(X_1) + B_1(\delta_F, \delta_R) [F_F \ F_R]^T \quad (2.25)$$

où :

$$A_1(X_1) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{g \sin \alpha}{v_2} - \theta_1 \end{bmatrix}, \quad B_1(\delta_F, \delta_R) = \begin{bmatrix} -\frac{L_F \cos \delta_F}{I_z} & \frac{L_R \cos \delta_R}{I_z} \\ -\frac{\cos \delta_F}{v_2 m} & -\frac{\cos \delta_R}{v_2 m} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Le modèle d'état (2.25) reformule le modèle dynamique de lacet en le présentant comme une forme linéaire en la commande (en prenant en compte les efforts latéraux comme deux variables de commande). L'objectif est ainsi de déterminer les forces latérales  $\hat{F}_F$  et  $\hat{F}_R$  au contact roue sol permettant par suite d'adapter les rigidités de dérive. Ceci peut se faire en notant  $\hat{X}_1$  l'état observé et en partant du principe, comme dans le cas de l'observateur précédent, que les forces calculées imposant la convergence de  $\hat{X}_1$  vers l'état mesuré  $\bar{X}_1$  constituent une estimation pertinente des efforts latéraux réels. Pour ce faire, on définit le modèle d'état (2.27) pour  $\hat{X}_1$  :

$$\dot{\hat{X}}_1 = A_1(\hat{X}_1) + B_1(\delta_F, \delta_R) [\hat{F}_F \ \hat{F}_R]^T \quad (2.27)$$

Pour assurer la convergence de  $\hat{X}_1$  vers  $\bar{X}_1$ , par l'intermédiaire des efforts latéraux estimés, une expression mathématique de ces derniers, assurant cette condition est la suivante :

$$[\hat{F}_F \ \hat{F}_R]^T = B_1(\delta_F, \delta_R)^{-1} \left( G_1 \tilde{X}_1 - A_1(\hat{X}_1) \right) \quad (2.28)$$

avec  $\tilde{X}_1 = \hat{X}_1 - \bar{X}_1$  l'erreur d'observation,  $G_1$  une matrice Hurwitz représentative de la dynamique désirée pour la réponse de l'observateur. L'expression d'estimation des efforts latéraux (2.28) existe sous la condition d'inversibilité de la matrice  $B_1(\delta_F, \delta_R)$  qui est assurée en pratique puisque les angles de braquage restent limités en pratique à  $\pm 22^\circ$  (i.e les valeurs des cosinus sont non nuls).

En effet, en injectant l'expression (2.28) dans le modèle d'état (2.27) et en négligeant la dérivée temporelle de l'état mesuré ( $\dot{\bar{X}}_1$ ), l'équation différentielle (2.29) est obtenue :

$$\dot{\tilde{X}}_1 = G_1 \tilde{X}_1 \quad (2.29)$$

ce qui assure bien la convergence  $\tilde{X}_1 \rightarrow 0$  et par conséquent  $\hat{X}_1 \rightarrow \bar{X}_1$ . Le choix des valeurs de la matrice  $G_1$  est déterminant. D'une part, des gains élevés permettent de rendre valide le fait que l'évolution des variables mesurées est négligeable ( $\dot{\tilde{X}}_1 = 0$ ). D'autre part, un poids plus important peut être mis sur l'erreur en vitesse de lacet  $\tilde{X}_1(1) = \dot{\hat{\theta}} - \dot{\bar{\theta}}$ , dont une mesure directe est disponible, vis-à-vis de l'angle de dérive globale  $\beta$ , dont seule une estimation  $\bar{\beta}$  issue de (2.23) et relativement peu réactive est disponible. Les efforts latéraux calculés par (2.28), puisqu'ils assurent la convergence de l'erreur d'observation vers 0, sont eux-mêmes considérés par la suite comme des estimations pertinentes des forces latérales réelles au contact roue/sol.

A partir de ces valeurs d'efforts estimées, l'adaptation des rigidités de dérive (vues ici comme des paramètres lentement variables d'un modèle) est réalisée en se basant sur l'expression des efforts latéraux (2.11) rappelée ci-dessous.

$$\begin{cases} F_F = C_F(\cdot) \beta_F \\ F_R = C_R(\cdot) \beta_R \end{cases} \quad (2.30)$$

Connaissant les angles de dérive par leur estimation réalisée à la première étape, il s'agit ici de trouver l'évolution des rigidités permettant une bonne superposition entre les efforts latéraux estimés  $\hat{F}_F$  et  $\hat{F}_R$  par l'équation (2.28) et leur expression mathématique formelle (2.30). Pour ce

faire, une première idée est de calculer directement la quantité  $\frac{F_i}{\beta_i}, i \in \{F, R\}$ , qui n'est définie que lorsque  $\beta_i \neq 0$ . Ceci oblige à arrêter l'adaptation lorsque les angles de dérive sont proches de zéro, ce qui ramène au cas de l'observateur évoqué précédemment et détaillé dans [LTCM10]. Une méthode d'adaptation basée sur la MIT Rule [AW94] est donc privilégiée, permettant de réduire une erreur  $e$  entre les sorties d'un modèle et leurs mesures correspondantes par une variation paramétrique.

Du point de vue générique, l'équation d'adaptation s'écrit :

$$\dot{K} = -\gamma_1 e \frac{\partial e}{\partial K} \quad (2.31)$$

où  $e = x - \bar{x}$  est l'erreur entre la sortie réelle  $\bar{x}$  d'un modèle  $x = f(K)$  dont  $K$  est un paramètre et  $\gamma_1$  est un gain strictement positif et ajustable de la loi d'adaptation (2.31). Pour le cas de l'adaptation des rigidités de dérive, le modèle considéré est l'expression des efforts latéraux (2.30) dont les paramètres sont les rigidités à estimer  $\hat{C}_F$  et  $\hat{C}_R$ . Ainsi, la particularisation de l'expression générale (2.31) à l'adaptation en ligne des rigidités de dérive est concrétisée par l'expression (2.32).

$$\begin{aligned} \dot{\hat{C}}_i &= -\gamma_1 (\hat{F}_i - \hat{C}_i \beta_i) \frac{\partial (\hat{F}_i - \hat{C}_i \beta_i)}{\partial \hat{C}_i} \\ &= -\gamma_1 (\hat{F}_i - \hat{C}_i \beta_i) \beta_i \end{aligned} \quad (2.32)$$

où  $i \in \{F, R\}$  et  $\beta_i$  sont les angles de dérive estimés par la première étape, grâce à l'expression (2.21). Cette loi d'adaptation assure que les forces issues de (2.30) convergent vers les forces latérales estimées par (2.28) ce qui assure la représentativité du modèle (2.7) et sa cohérence vis-à-vis du modèle cinématique étendu (2.4) puisque celui-ci utilise les expressions d'observation basées uniquement sur le modèle cinématique étendu.

**Troisième étape** Comme évoqué dans le point précédent, à partir du moment où une estimation des rigidités de dérive est disponible, le modèle dynamique dans la représentation de lacet, et prenant en compte un modèle d'interaction roue sol (modèle (2.12)), est entièrement connu. Il devient ainsi exploitable pour procéder à une estimation des angles de dérive à partir d'un point de vue dynamique, rendant l'observation plus réactive, car intégrant les phénomènes négligés dans la stratégie privilégiée en section 2.2.1. Pour y parvenir, le modèle (2.12) est réécrit uniquement en fonction de l'angle de dérive global ( $\beta_F$  et  $\beta_R$  sont éliminés par l'intermédiaire de la troisième et quatrième équation du système (2.12)) et linéarisé en faisant l'hypothèse de petits angles pour les valeurs atteintes par la dérive globale  $\beta$  :

$$\dot{X}_2 = A_2(C_F, C_R)X_2 + B_2(C_F, C_R)[\delta_F \ \delta_R]^T \quad (2.33)$$

où :

$$A_2(C_F, C_R) = \begin{bmatrix} \frac{-L_F^2 C_F - L_R^2 C_R}{v_2 I_z} & \frac{-L_F C_F + L_R C_R}{I_z} & 0 \\ -\frac{L_F C_F - L_R C_R}{v_2^2 m} - 1 & -\frac{C_F + C_R}{v_2 m} & \frac{g}{v_2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2(C_F, C_R) = \begin{bmatrix} \frac{L_F C_F}{v_2 m} & \frac{L_R C_R}{v_2 m} \\ \frac{C_F}{v_2 m} & \frac{C_R}{v_2 m} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Dans le modèle (2.33), l'état  $X_2$  est défini par :

$$X_2 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \beta_2 \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Celui-ci est identique dans sa définition à l'état  $X_1$ , mais il est étendu par l'inclinaison de la masse non suspendue (le terme  $\sin \alpha$ ). Bien que l'estimation de cette inclinaison ne soit pas observée dans la méthode présentée ici, son introduction dans l'état permet de conserver la linéarité de l'écriture. En outre, l'état  $X_2$  diffère de  $X_1$  dans le sens où son équation d'évolution est sensiblement différente puisque celle-ci est exprimée en fonction des rigidités de dérive. Comme dans l'étape précédente, une mesure de cet état est disponible :  $\bar{X}_2 = [\hat{\theta} \ \hat{\beta} \ \sin \alpha]^T$ . Compte tenu de cette définition, une observation  $\hat{X}_2$  de l'état  $X_2$  est donnée par :

$$\dot{\hat{X}}_2 = A_2(\hat{C}_F, \hat{C}_R)\hat{X}_2 + B_2(\hat{C}_F, \hat{C}_R)\delta_F + G_2\tilde{X}_2 \quad (2.36)$$

où  $\tilde{X}_2 = \hat{X}_2 - \bar{X}_2$  est l'erreur d'observation et  $G_2$  une matrice de gain définissant la dynamique de l'erreur d'observation. Dans cette équation, les rigidités de dérive utilisées sont les valeurs estimées par l'intermédiaire de la loi d'adaptation (2.32) représentative des rigidités réelles.

L'équation d'observation (2.36) assure la convergence de l'erreur d'observation, puisqu'en écrivant la dérivée de cette erreur, et en considérant que  $(\hat{C}_F, \hat{C}_R) = (C_F, C_R)$ , on obtient :

$$\dot{\tilde{X}}_2 = (A_2 + G_2)\tilde{X}_2 \quad (2.37)$$

Ce qui, en choisissant la matrice  $G_2$  définie par :

$$G_2 = \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & 0 \\ g_{2,1} & g_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

qui garantit que la matrice  $(A_2 + G_2)$  est Hurwitz. Ceci assure une convergence exponentielle de l'erreur d'observation  $\tilde{X}_2$  vers 0. La définition de la matrice  $G_2$ , permet d'obtenir la convergence des deux premières composantes de  $\hat{X}_2$ . La troisième, composée du terme  $\hat{X}_2(3) = \sin \alpha$  est considérée égale par définition à la mesure réalisée du sinus de l'angle d'inclinaison de la masse non suspendue. Son réglage permet d'influer sur la dynamique de l'erreur, pour laquelle plus de poids est mis sur l'erreur en vitesse de lacet, dont la mesure est directe, contrairement à l'estimation de l'angle de dérive global, dont l'estimation se révèle plus lente.

Une fois l'état  $\hat{X}_2$  correctement observé par l'équation (2.36), une observation des angles de dérives avant et arrière découle de cet état estimé (par l'intermédiaire d'une représentation dynamique), en utilisant les troisième et quatrième lignes du modèle dynamique de lacet (2.12) :

$$\begin{aligned} \beta_R^{Dyn} &= \arctan\left(\tan \hat{\beta}_2 - \frac{L_R \dot{\theta}_2}{v_2 \cos(\hat{\beta}_2)}\right) - \delta_R \\ \beta_F^{Dyn} &= \arctan\left(\tan \hat{\beta}_2 + \frac{L_F \dot{\theta}_2}{v_2 \cos(\hat{\beta}_2)}\right) - \delta_F \end{aligned} \quad (2.39)$$

Cette nouvelle expression pour l'estimation des dérives avant et arrière est notée par l'exposant *Dyn* afin de la différencier de l'estimation basée uniquement sur le modèle cinématique étendu par l'équation (2.21). Ces deux estimations, basées sur des modèles différents, sont représentatives de la même grandeur physique. Elles doivent donc être similaires dans des conditions où les effets dynamiques sont négligeables et différentes dans les cas où ces dynamiques sont prépondérantes.

## 2.2.3 Résultats liés à l'observation

### 2.2.3.1 Comparaison des approches

Afin de pouvoir évaluer les différences entre les deux principes d'estimation des dérives, et de pouvoir les comparer, des résultats d'essais réel, pour lesquels les deux types d'observateur sont

calculés en temps réel, sont proposés. L'impact sur le résultat de suivi sera discuté dans la partie commande, à la section 2.3, et l'impact sur la précision de déplacement sera mis en évidence. Des résultats simulés sont présentés dans [LTCM10], montrant la pertinence théorique de l'approche multi-modèle proposée. Seuls des résultats provenant du suivi d'une trajectoire et sur le robot RobuFAST (dont une illustration est donnée sur la figure 2.13(a) et dont les caractéristiques sont détaillées en Annexe A) sont présentés ici à titre d'exemple.

Dans cette configuration la trajectoire de référence est donnée sur la figure 2.13(b), et superposée à un fond de carte illustrant le terrain d'évolution. Celle-ci est majoritairement constituée de deux cercles exécutés sur des terrains différents : la première partie est réalisée sur asphalt, tandis que la seconde sur un terrain composé de gazon sec. Cette trajectoire a été suivie de façon autonome

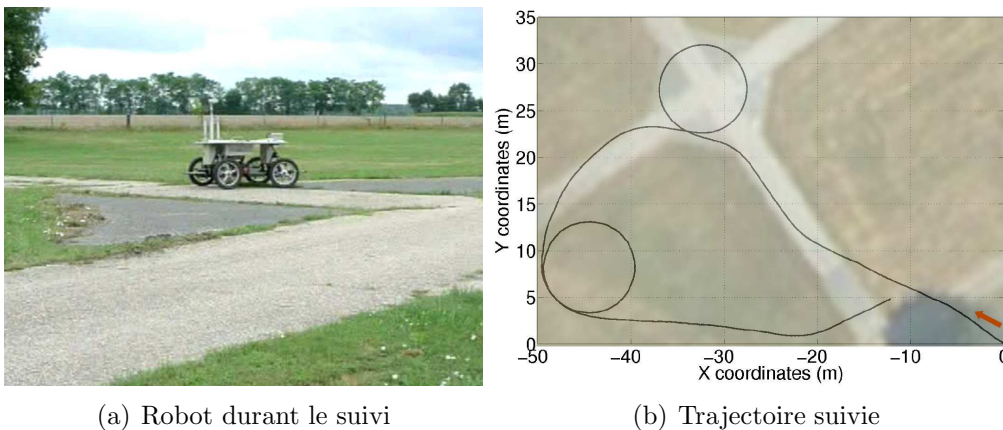


FIGURE 2.13 – Conditions d'essais pour la comparaison d'estimateurs de dérive

à deux reprises en utilisant des vitesses d'avancement différentes, mais constantes durant le suivi. Dans le premier cas, le suivi a été réalisé à  $4m.s^{-1}$  tandis que dans le deuxième cas, l'algorithme a été mis en place pour une vitesse d'avance de  $6m.s^{-1}$ . Ces deux essais permettent ainsi de mettre en évidence les similarités et différences entre les différentes méthodes d'observation.

**Résultats à 4 m/s** Pour cette valeur de vitesse, l'utilisation du modèle cinématique seul pour l'estimation des angles de dérive et dans le cadre de la commande des déplacements trouve ses limites, du point de vue de la précision atteinte. Durant cet essai, à vitesse relativement limitée, les deux algorithmes d'observation ont été activés en temps réel, afin de pouvoir procéder à des comparaisons. A ce titre, les angles de dérive avant estimés par les deux observateurs, et enregistrés durant l'essai sont tracés sur la figure 2.14. En trait interrompu en rouge, figure l'angle de dérive avant estimé par l'intermédiaire du modèle cinématique étendu seul (équation d'observation (2.21) et noté ObsCin par la suite), tandis que l'angle observé par l'intermédiaire de l'observateur multi-modèle (équation (2.39) et noté ObsDyn dans la suite) est représenté en trait plein et magenta. On peut tout d'abord noter que les bruits enregistrés par la méthode ObsDyn sont plus importants que pour l'observateur ObsCin. Ceci est dû au fait que ObsDyn requiert l'inversion d'une matrice dans laquelle la vitesse  $v_2$  intervient en tant que dénominateur de certains termes, qui entraîne une sensibilité importante aux bruits de mesure à vitesses faibles. Ce fait est mis en évidence par comparaison avec la dérive obtenue à  $6m.s^{-1}$  sur la figure 2.16. Bien que ce bruit soit plus élevé on peut constater que les deux estimations sont relativement superposées durant les deux cercles. Dans ces conditions, les deux estimations de la dérive avant convergent vers  $2.5^\circ$  durant le premier cercle (exécuté à droite sur bitume, entre 11 et 20s) et

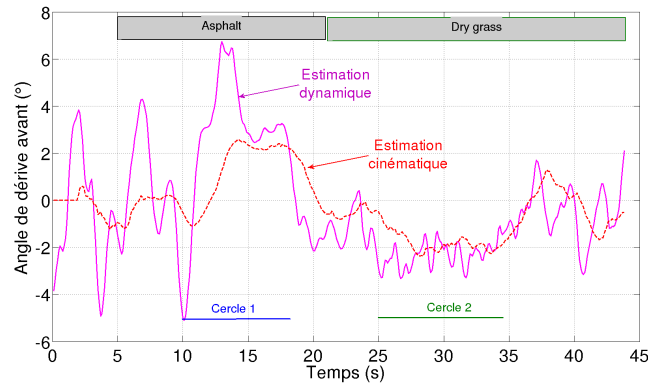


FIGURE 2.14 – Comparaison des dérives estimées à 4 m/s

vers  $-2^\circ$  durant le deuxième (exécuté à gauche sur de l'herbe sèche, entre 25 et 35s). Les deux reconSTRUCTEURS donnent ainsi des valeurs similaires durant les phases permanentes (lignes droites, virages à courbure constante). Toutefois on remarque que dans les transitoires, l'observateur ObsDyn permet d'être plus réactif puisqu'il est en avance par rapport aux estimations issues de ObsCin. C'est en particulier vrai au début et à la fin du premier cercle (à 11s et 15s). De plus lors du début du virage, l'angle estimé par ObsDyn enregistre une valeur plus élevée de  $6^\circ$  avant de converger vers la valeur constante de  $2.5^\circ$ , qui s'explique par la prise en compte de la non linéarité et du temps d'adaptation des rigidités de dérive. Les mêmes commentaires s'appliquent dans une moindre mesure pour le deuxième cercle.

En effet, pour le deuxième cercle, exécuté sur de l'herbe sèche, et à cette vitesse, les crampons des pneumatiques pénètrent dans le sol, rendant le contact plus adhérent que sur le bitume où les crampons ne s'enfoncent pas et réduisent ainsi la surface de contact au sol. Dès lors, les conditions d'adhérence sont meilleures sur l'herbe et l'influence des effets dynamiques s'en trouve diminuée. L'évolution des angles de dérive est alors ralentie et les deux estimations sont alors très proches.

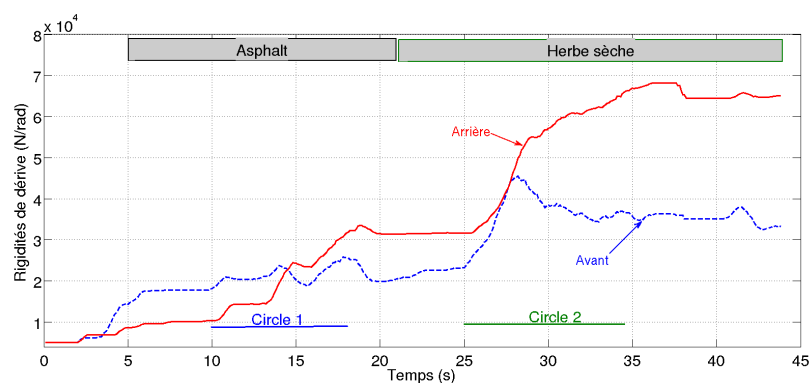


FIGURE 2.15 – Rigidités de dérive adaptées à 4 m/s

Cette différence dans les conditions d'adhérence se retrouve sur la figure 2.15, sur laquelle les rigidités de dérive avant et arrière calculées dans le cadre de l'observation par ObsDyn (équation d'adaptation (2.32)) sont tracées. Cette figure montre clairement une valeur de convergence différente lors du premier et du second virage. Cette adaptation en fonction des conditions d'adhérence permet ainsi, à l'estimation dynamique des dérives de conserver sa pertinence quel que soit le type de sol et sans identification préalable. La représentation dynamique est alors

pertinente et consistante avec la représentation cinématique. A cette vitesse et dans ces conditions, les deux méthodes d'estimation ObsDyn et ObsCin restent relativement proches, du fait que les effets dynamiques peuvent être négligés.

**Résultats à 6 m/s** Si à basse vitesse, l'intérêt de l'observateur ObsDyn est discutable (du moins pour l'estimation des angles de dérive), les résultats de suivi de la même trajectoire que précédemment, mais à plus haute vitesse ( $6m.s^{-1}$ ) sont très différents. A cette vitesse, les conditions d'adhérence sont bien plus faibles et les effets dynamiques s'en trouvent considérablement accentués. Des différences importantes sur l'estimation des dérives entre les méthodes ObsCin et ObsDyn peuvent alors être clairement mises en évidence. Les angles de dérive avant estimés par les deux méthodes sont comparés sur la figure 2.16, avec le même code couleur que celui utilisé sur la figure 2.14.

Avant tout, il peut être constaté que le niveau de bruit enregistré sur la dérive estimée par

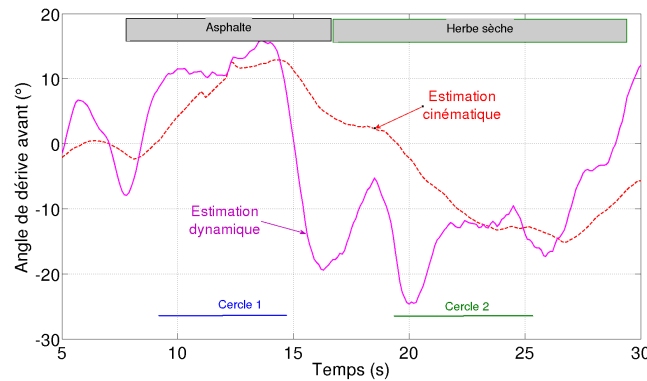


FIGURE 2.16 – Comparaison des dérives estimées à 6 m/s

ObsDyn est considérablement réduit, renforçant ainsi le commentaire fait précédemment sur ce point. Le niveau de vitesse étant plus élevé, le conditionnement de la matrice contenant des termes en  $\frac{1}{v_2}$  s'en trouve amélioré. Mais la plus grande différence par rapport aux résultats obtenus à  $4m.s^{-1}$  réside dans la différence sur la réactivité des observateurs. Si la dérive estimée par ObsDyn lors des cercles converge immédiatement (vers  $10^\circ$  pour le premier cercle, entre 9 et 15s et vers  $-12^\circ$  pour le second, entre 18 et 26s), il n'en va pas de même pour l'estimation par la méthode ObsCin. La courbe en trait interrompu rouge converge en effet vers des valeurs semblables, mais beaucoup plus lentement, puisque pour le premier cercle, celle-ci rejoint la courbe magenta à 13.5s soit 4s après l'entrée dans le virage. Il en va de même pour le deuxième cercle pour lequel on enregistre un dépassement pour la dérive estimée par ObsDyn, liée au temps d'adaptation des rigidités de dérive.

Celles-ci, tracées sur la figure 2.17 doivent converger vers des valeurs pertinentes pour permettre une bonne estimation des dérives. Ainsi, on constate que par l'intermédiaire de la MIT rule, utilisée pour l'adaptation de  $C_F$  et de  $C_R$ , l'évolution des rigidités est naturellement très lente lors de faibles conditions d'observabilité (durant les lignes droites), mais s'adapte rapidement dès que le modèle est suffisamment excité (virage rapide ou pente). En conséquence, dès que le robot entre dans une courbe ou un terrain non plan, les rigidités s'adaptent rapidement (ici dès que le robot tourne, durant les cercles). Le temps d'adaptation, même faible, génère alors un court dépassement comme cela est mis particulièrement en évidence à 20s : le robot



commence à tourner mais la rigidité est encore à une valeur erronée, créant ainsi le dépassement à  $-20^\circ$  de la dérive avant.

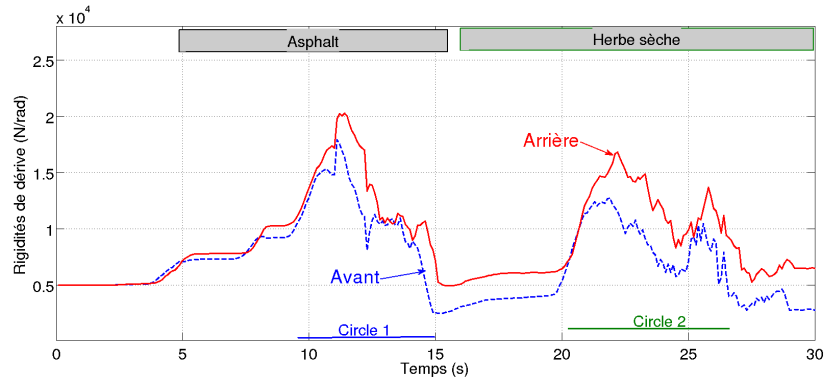


FIGURE 2.17 – Comparaison des rigidités de dérive adaptés à 6 m/s

A la lecture de la figure 2.17, on remarque tout d’abord la grande différence dans les conditions d’adhérence entre les deux essais et de fait l’influence de la vitesse de rotation des roues sur le niveau d’adhérence. De plus, à la vitesse de  $6m.s^{-1}$  l’adhérence sur l’herbe est moins importante que sur le bitume (dans ce cas les crampons n’ont effectivement pas le temps de pénétrer dans le sol et limitent l’accroche du pneu sur le sol). Ce type de comportement est de fait naturellement pris en compte dans l’adaptation des rigidités de dérive, ce qui permet d’obtenir une très grande réactivité des dérives, même si des dépassements ponctuels, liés au temps de réponse des algorithmes peuvent être enregistré. L’influence de ce comportement sur la commande des déplacements, détaillée dans la section 2.3.3.3 peut être néanmoins anticipée. Si la valeur des dérives est sous estimée, l’angle de braquage le sera aussi et le robot ne pourra s’asservir correctement sur la trajectoire désirée. Or l’observateur ObsCin, par nature, converge très lentement vers une valeur correcte (ici 4s pour le premier cercle), et ne pourra ainsi pas permettre un bon asservissement sur la majeure partie du premier cercle, créant de plus des effets oscillatoires liés au retard d’estimation.

### 2.2.3.2 Application à la détection du risque de renversement d’un véhicule

Si la connaissance des angles de dérive, permet d’obtenir des lois de commande pour asservir de façon précise les déplacements d’un robot, l’adaptation des paramètres dynamiques des modèles et l’observation de leurs variables, peut avoir des retombées dans des champs connexes à la robotique, et pour d’autres thèmes que la commande des déplacements. Ainsi, dans le cadre de la thèse [Bou09] (étendus par [RLTD11] pour la prise en compte de l’inclinaison et de l’adaptation des rigidités par MIT Rule), une version dégradée de l’observateur multi-modèle ObsDyn (appelée ci-après ObsDynDeg) est proposée pour le rendre compatible avec un véhicule conduit manuellement (ici un quad présenté sur la figure 2.18(a) et dont les caractéristiques sont détaillées à l’annexe A). Dans ces travaux, l’objectif est d’estimer en ligne et d’anticiper le risque de renversement pour prévenir une perte de stabilité. Dans de telles applications, la notion de suivi de trajectoire est absente, et le système doit pouvoir être intégré sur des véhicules réels (n’autorisant pas l’emploi de capteurs onéreux comme le capteur GPS-RTK). En conséquence, les données extéroceptives de position et d’orientation ( $y$  et  $\tilde{\theta}$ ) ne sont pas disponibles. Seuls la vitesse, l’angle de braquage avant, la vitesse de lacet et les informations d’inclinaison sont supposés

connus, mais demeurent insuffisants pour reconstruire le transfert de charge par l'équation (2.14). Aussi, pour estimer le transfert de charge l'algorithme ObsDyn défini dans la section 2.12 est

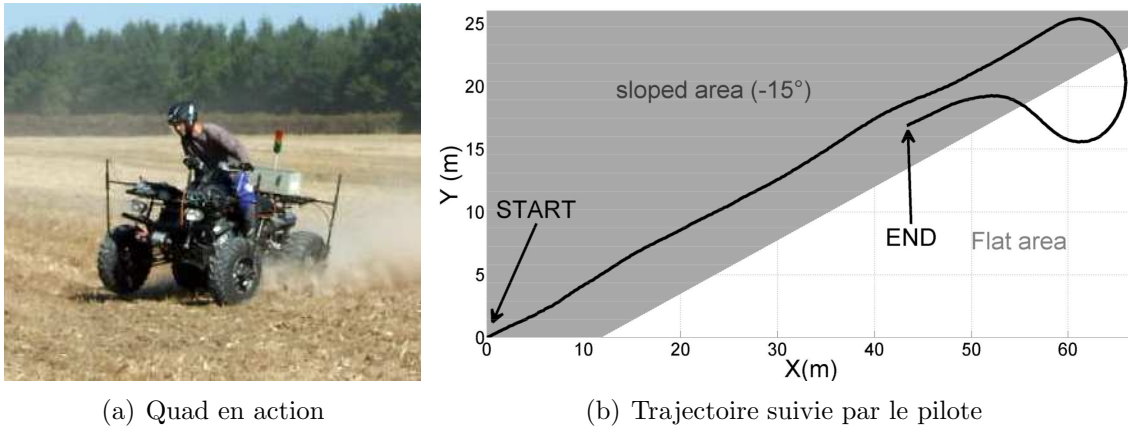


FIGURE 2.18 – Conditions d'essais pour l'estimation et l'anticipation du risque de renversement

repris, mais la première étape (estimation par un modèle cinématique étendu), permettant d'estimer la dérive globale du véhicule, est remplacée par un calcul de la dérive globale permettant la convergence de la vitesse de lacet observée vers la vitesse de lacet mesurée. De fait, il n'est pas possible d'estimer des dérives séparées entre l'avant et l'arrière. Ainsi, le calcul des rigidités de dérive à l'étape 2 est limité à l'adaptation d'une rigidité globale supposée être la même pour l'avant et l'arrière. Bien que limité, cet observateur permet néanmoins de déterminer les variables nécessaires à l'évaluation de la métrique représentative du risque de renversement de manière suffisamment précise et réactive. Pour le démontrer, un résultat d'essai réalisé sur le quad de la figure 2.18(a) piloté manuellement à une vitesse variable comprise entre 3 et  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  est proposé. Durant cet essai, le pilote a réalisé la trajectoire représentée sur la figure 2.18(b), composée d'une ligne droite sur un terrain en pente de  $15^\circ$  puis d'un demi tour effectué sur une partie plane et un retour sur la même pente.

Comme décrit en annexe A, le quad est équipé - en plus des capteurs extéroceptifs permettant de mesurer les variables  $(v, \delta_F, \dot{\theta}, \alpha)$  - de capteurs dynamométriques, permettant la mesure des efforts de contact et en particulier des efforts normaux. Ceci permet de mesurer le transfert de charge par sa définition (2.13), afin d'avoir une valeur de référence, autorisant l'étude de la pertinence de l'estimation proposée par le couplage entre l'observateur ObsDynDeg et le calcul du transfert de charge par l'équation (2.14). Sur la figure 2.19, ces deux valeurs sont comparées, et il apparaît que l'estimation du transfert de charge (en rouge sur la figure) se superpose correctement avec la mesure directe obtenue par les dynamomètres tournants (courbe en noire). Durant la première ligne droite en pente, les deux courbes se stabilisent vers une valeur de 20% (soit un transfert de charge de 0.2). Durant le virage, les deux valeurs s'écartent légèrement, en raison d'un retard d'estimation de l'inclinaison  $\alpha$  dans l'observateur ObsDynDeg, puis convergent de nouveau vers une valeur proche égale à 30%. Enfin, après le retour sur la ligne droite, les valeurs convergent vers une valeur proche autour de -20% symétrique de la première ligne droite. La valeur estimée du transfert de charge est néanmoins sensiblement différente de la mesure dans cette dernière portion. Une telle différence peut s'expliquer par le comportement physique du pilote. Son inclinaison n'est pas prise en compte dans ces travaux et compte-tenu de sa masse (non négligeable par rapport à la masse du quad), son influence n'est pas négligeable et

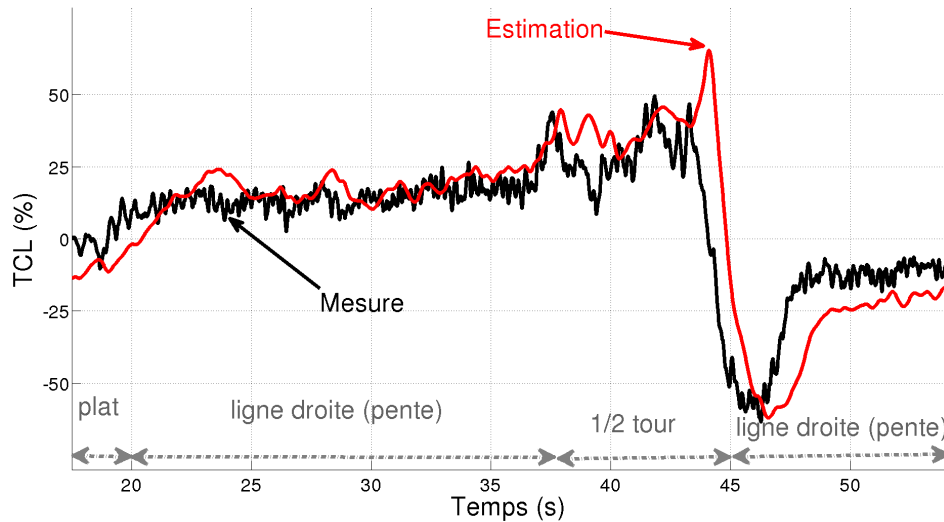


FIGURE 2.19 – Comparaison entre Transfert de Charge mesuré et estimé

peut expliquer une telle différence. Toutefois, vis-à-vis des valeurs atteignables par le transfert de charge, la précision atteinte est intéressante. On constate par ailleurs un léger retard du

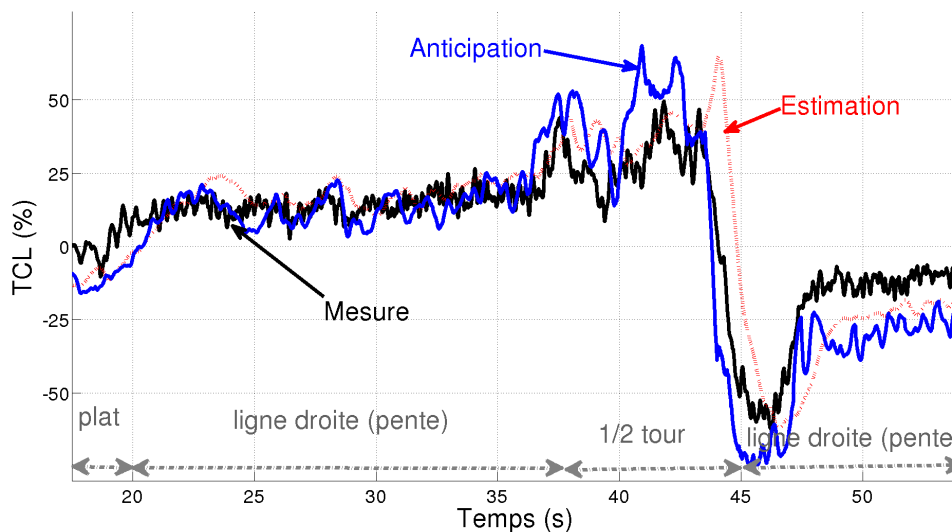


FIGURE 2.20 – Comparaison entre Transfert de Charge mesuré/estimé et anticipé

TCL estimé, qui peut être préjudiciable dans le cadre de la conception de dispositifs d'aide à la conduite pour avertir le pilote de la dangerosité de ses manœuvres. Ici, il n'y a pas de notion de trajectoire à suivre, et aucune action prédictive sur cette trajectoire de référence ne peut être envisagée. Cependant, comme les valeurs de l'angle de braquage et de la vitesse sont mesurées, une extrapolation de celles-ci à l'ordre 1 est implémentée pour compenser ce retard d'estimation et anticiper sur le risque. En utilisant un horizon de prédiction de 1s pour extrapoler les actions du pilote (en considérant les conditions d'adhérence constantes sur cet horizon), la valeur prédite du transfert de charge reportée en bleu sur la figure 2.20 est obtenue. Sur cette dernière courbe, il apparaît que, par l'intermédiaire de l'extrapolation, le transfert de charge peut être anticipé. En contrepartie, celui-ci est légèrement surestimé dans les transitoires (notamment à 37s et 45s). Une telle anticipation permet néanmoins de pouvoir renseigner le pilote sur les risques qu'il prend et d'envisager la mise en place d'action de correction pour augmenter la sécurité des engins légers

tout-terrain. Ceci montre par ailleurs la généralité des approches et la possibilité de trouver des champs d'application plus immédiats que la commande de robots complètement autonomes.

## 2.2.4 Synthèse sur les approches d'observation proposées

Dans cette section, plusieurs méthodes d'observation différentes et complémentaires, pour l'estimation de variables d'état et de paramètres, pour l'alimentation de modèles d'évolution de robots mobiles en milieux naturels ont été abordées. Quelques résultats ont permis d'analyser leurs atouts, leurs faiblesses et leurs domaines de validité. Pour aller plus loin, le tableau 2.1 résume les différences entre les approches en termes de mesures nécessaires, de paramètres à identifier et de domaines d'application possibles.

	ObsCin	ObsDyn	ObsDynDeg
Variables mesurées nécessaires	$(y, \tilde{\theta}, v)$	$(y, \tilde{\theta}, v_2, \dot{\theta}, \alpha)$	$(v_2, \dot{\theta}, \alpha)$
Paramètres requis	$(L)$	$(L_F, L_R, m, I_z)$	$(L_F, L_R, m, I_z)$
<i>Utilisations possibles</i>			
Déplacements à basse vitesse	oui	très bruité	non
Déplacements à haute vitesse	non	oui	non
Gestion de la stabilité	non	oui	oui
Gestion de traversabilité	non	oui	oui
Gestion de la contrôlabilité	non	oui	non

TABLE 2.1 – Comparaison des approches d'observation

A la vue de ce tableau de synthèse, il apparaît que l'approche cinématique étendue ObsCin est celle qui requiert le moins de paramètres à identifier, et une mesure limitée du nombre de variables. Toutefois comme il est mis en avant dans la section 2.1, celle-ci demeure limitée en terme de réactivité et n'est donc efficace que dans un champ restreint de vitesses pour ce qui est du contexte tout-terrain, puisque les faibles conditions d'adhérence ont tendance à amplifier les effets dynamiques.

A contrario, l'observateur ObsDyn est beaucoup plus réactif car il prend en compte ces effets dynamiques et une équation d'évolution des dérivées. Ceci est rendu possible par l'adaptation en ligne des rigidités de dérive qui donne une information supplémentaire sur l'état du terrain, présentant également un intérêt en dehors du cadre strict de la commande de robots mobiles. Ceci autorise de plus une anticipation plus importante pour les algorithmes de commande puisque les conditions de sol sont un élément déterminant du comportement du robot. Toutefois, son comportement à basse vitesse est peu satisfaisant puisque le modèle est peu excité et génère un bruit important. Par ailleurs, l'observateur ObsDyn nécessite la mesure de plus de variables. Le couple  $(\dot{\theta}, \alpha)$  est requis, mais limité uniquement à la vitesse de lacet  $\dot{\theta}$  si l'évolution sur terrain plat est acquise. Le nombre de paramètres est également plus important, puisque les caractéristiques dynamiques interviennent dans les modèles. Une connaissance précise de ces paramètres n'est toutefois pas requise, car l'adaptation des rigidités de dérive dépend de ceux-ci. Ainsi, si une masse ou une inertie imprécise est rentrée, les rigidités de dérive convergeront vers des valeurs différentes (voir [LTCM10]), qui permettront de garder une bonne représentativité du modèle et donc de l'estimation des angles de dérive. En conséquence, l'adaptation des rigidités peut compenser une incertitude paramétrique, sous réserve que les rigidités calculées ne mènent pas à des singularités de modélisation (par exemple des valeurs négatives pour  $C_F$  ou  $C_R$ ).

Cette robustesse est moins évidente pour la version dégradée de l'observateur ObsDynDeg. Ceci est dû au fait qu'il n'y a pas de valeurs préliminaires des angles de dérive avant et arrière ( $\beta_F$  et  $\beta_R$ ). Cette connaissance préalable permet dans ObsDyn de distinguer les conditions d'adhérence entre le train avant et le train arrière, ce qui n'est pas le cas de ObsDynDeg, qui considère une rigidité unique. En conséquence, le passage du comportement du robot de sous-vireur à survireur, défini par le signe de la quantité  $C_F L_F - C_R L_R$ , ne peut être traduit. La quantité correspondante est dans ce cas  $C_e(L_F - L_R)$  où  $C_e$  est la rigidité globale, dont le signe ne dépend que de la position longitudinale du centre de gravité donnée par les demi empattements  $L_F$  et  $L_R$  qu'il convient de déterminer avec une grande précision. Si des astuces permettent de s'affranchir de cette singularité, celle-ci constitue néanmoins une limitation. La dépendance vis-à-vis des autres paramètres ( $m, I_z$ ) est beaucoup moins importante. Enfin, le nombre limité de variables nécessaires et la simplicité de leur mesure permet d'envisager - comme mis en avant dans la section 2.2.3.2 - l'utilisation d'algorithmes d'estimation des conditions d'adhérence ou de risque de renversement sur des véhicules conduits manuellement.

## 2.3 Synthèse de lois de commande pour le déplacement

### 2.3.1 Philosophie Générale

Les développements présentés précédemment sur la modélisation et sur l'observation ont montré la capacité à développer des modèles permettant de caractériser finement le comportement dynamique d'un robot mobile évoluant à haute vitesse en milieu naturel. Par l'intermédiaire des techniques d'observation, les représentations décrites conservent cependant un degré de complexité suffisamment faible autorisant la synthèse de lois de commande. Compte-tenu de la mise à jour en ligne des variables internes, de telles lois de commande doivent par essence être adaptatives pour intégrer ces variations et conserver leurs performances dans ce contexte.

Plusieurs types de schéma de commande adaptative (voir [AW94] ou [LT01]) ont été développés. Les principales différences résident dans le positionnement de l'action adaptative. Tout d'abord, celle-ci peut être mise en place en parallèle de la commande classique, afin de faire converger le comportement réel vers le modèle théorique (comme réalisé dans [LGSB08] ou plus récemment dans [LLG<sup>+</sup>10] concernant les présents travaux et en associant plusieurs niveaux de commande). L'action d'adaptation peut aussi être un terme ajouté à la commande pour tenir compte d'une variation entre l'état théorique du modèle et l'état réellement mesuré (comme par exemple dans [TWH00] pour le cas des robots manipulateurs). Enfin, l'adaptation peut se faire directement au sein des paramètres ou des variables internes d'un modèle (commande adaptative référencée modèle), sur lequel la loi de commande est ensuite calculée. Au vu de la stratégie d'observation décrite précédemment, c'est clairement cette déclinaison qui est mise en avant dans le cadre de ces travaux, permettant de disposer d'un modèle à la fois pour calculer des lois de commande, et également, pour caractériser la dynamique afin de réaliser des indicateurs pour l'aide à la conduite (voir par exemple la section 2.2.3.2).

Si la commande adaptative permet de tenir compte des variations des conditions d'interaction entre le robot et son environnement, celle-ci se révèle insuffisante pour tenir compte des effets dynamiques, même à vitesse modérée. Les temps de réponse des actionneurs (actionnement des angles de braquage et de la vitesse de rotation des roues), ne sont plus négligeables pour des vitesses supérieures à environ 1m/s. Qui plus est, les effets inertiels ont une influence importante au-delà de 4m/s. Il est alors nécessaire de pouvoir anticiper sur la commande de ces actionneurs pour compenser les effets liés aux régimes transitoires. Comme dans le cas de l'indicateur risque, il est possible d'extrapoler les commandes actuelles pour réaliser cette anticipation. Toutefois, dans le cadre du suivi de trajectoire, l'utilisation de la trajectoire de référence pour anticiper sur les commandes probables peut être exploitée. Si les techniques de commande prédictive peuvent être appliquées en utilisant directement la courbure future (voir par exemple [Mul92]), la commande prédictive à modèle [Ric93] est ici privilégiée. Ce type de commande (appliqué sur les robots mobiles notamment dans [PI08]) a pour avantage de considérer explicitement un modèle de comportement. Ceci permet donc de prendre en compte de façon précise le bas niveau ainsi que les effets inertiels.

A partir de ce double principe de commande (adaptative et prédictive), le contrôle de mobilités additionnelles au schéma classique d'Ackermann est envisagé dans ce mémoire par l'intermédiaire de principes de commande en cascade (ou backstepping, voir notamment [JN97] ou [KZ00] pour le cas de la commande de robots mobiles). Comme il sera mis en évidence par la suite, ce point de vue permet de s'affranchir des limitations liées à l'utilisation de techniques de commande

classiques.

Dans cette section, plusieurs principes de commande permettant le contrôle de robot mobile en préservant la précision de ses déplacements et son intégrité sont développés. Ces différentes lois interviennent à différents niveaux et sont dédiées à plusieurs types d'applications. Le tableau 2.2 résume ces niveaux d'intervention, ainsi que leur utilité pratique. Les lois de commande sont ensuite détaillées dans les sous-sections, permettant une présentation par degré de complexité croissant. A l'issue de cette présentation, un schéma de commande global reprenant l'ensemble de ces développements résumera l'imbrication des différentes actions et leur intérêt pour la commande de robot en milieu peu structuré et à haute dynamique.

	Commande adaptative	Commande prédictive	Commande en cascade
<b>Commande des déplacements à vitesse modérée</b>			
<i>Commande angle de braquage avant</i>	prise en compte des glissements	anticipation du temps de réponse des actionneurs	
<i>Commande deux trains directeurs</i>	prise en compte des glissements	anticipation du temps de réponse des actionneurs	gestion de l'écart angulaire
<i>Commande avec remorque</i>	prise en compte des glissements	anticipation du temps de réponse des actionneurs	gestion de l'écart latéral de la remorque
<b>Gestion de la vitesse</b>			
<i>Planification et commande de demi-tour</i>	prise en compte des glissements	anticipation du temps de réponse des actionneurs	
<i>Commande en formation d'une flotte de robots</i>	prise en compte des glissements	anticipation du temps de réponse des actionneurs et de la distance inter-véhicule	
<i>Déplacements à haute vitesse</i>	prise en compte des glissements	anticipation des effets dynamiques	
<b>Commande de maintien d'intégrité</b>			
<i>Gestion de stabilité dynamique</i>	adaptation des conditions d'adhérence	gestion de la vitesse	
<i>Gestion de traversabilité</i>	adaptation des conditions d'adhérence	gestion de la vitesse	
<i>Admissibilité des commandes générées</i>	adaptation des conditions d'adhérence	gestion de la vitesse	

TABLE 2.2 – Implémentation des stratégies de commande

## 2.3.2 Commande précise des déplacements à vitesse modérée

### 2.3.2.1 Commande de l'angle de braquage pour le suivi de trajectoire

**Commande adaptative** Dans un premier temps, seule la commande de l'angle de braquage avant est considérée pour asservir la commande des déplacements d'un robot mobile par rapport à une trajectoire prédéfinie, sur une consigne  $y^d$ , potentiellement variable (la dérivée de cette consigne est alors notée  $\dot{y}^d$  - les ordres supérieurs sont négligés). La vitesse  $v$ , ainsi que l'angle de braquage arrière  $\delta_R$  sont considérés comme des paramètres mesurés du modèle et, le cas échéant, lentement variables. Avec ces hypothèses, le modèle cinématique (2.6) est considéré. En supposant connus les angles de dérive  $\beta_F$  et  $\beta_R$ , grâce à l'estimation en ligne issue de l'observateur ObsCin défini par (2.21), le modèle cinématique étendu devient entièrement exploitable pour la commande. Comme mis en avant dans la section 2.1.3.2, celui-ci est consistant avec un modèle cinématique classique sous hypothèse de roulement sans glissement, et en conserve toutes les propriétés. En particulier, en vertu de [MS93], celui-ci peut être mis sous une forme linéaire exacte en le transformant en système chaîné.

En effet, comme mis en évidence dans [Sam95] et détaillé dans [CLTM08] pour notre cas d'étude, le système (2.6) peut être converti sous la forme générale (2.40) d'un système chaîné de dimension trois  $(a_1, a_2, a_3)$  et reposant sur deux entrées  $(m_1, m_2)$ .

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = \frac{da_1}{dt} = m_1 \\ \dot{a}_2 = \frac{da_2}{dt} = a_3 m_1 \\ \dot{a}_3 = \frac{da_3}{dt} = m_2 \end{cases} \quad (2.40)$$

La transformation d'état autorisant la conversion en un système chaîné est donnée par (2.41)

$$[s, y, \tilde{\theta}] \rightarrow [a_1, a_2, a_3] = [s, y, (1 - c(s)y) \tan(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R)] \quad (2.41)$$

tandis que le changement de commande est donné par (2.42)

$$[v, \delta_F] \rightarrow [m_1, m_2] = \left[ \frac{v \cos(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R)}{1 - c(s)y}, \frac{da_3}{dt} \right] \quad (2.42)$$

Le calcul explicite de  $m_2$  conduit à (2.43), en supposant que  $\dot{\delta}_R + \dot{\beta}_R = 0$ .

$$\begin{aligned} m_2 &= c(s)v \sin(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R) \tan(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R) \\ &+ y \frac{dc}{ds} \tan(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R) \frac{V_r \cos(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R)}{1 - c(s)y} \\ &+ v \frac{1 - c(s)y}{\cos^2(\tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R)} [\cos(\delta_R + \beta_R)\lambda_1 - \lambda_2] \end{aligned} \quad (2.43)$$

L'objectif de la loi de commande est ici d'assurer le suivi de trajectoire. Dans notre application,  $v$  est considérée comme un paramètre. Le but est d'amener et maintenir à  $y^d$  la variable  $a_2 = y$ . De plus, comme mentionné dans [Sam95], il est très attractif de remplacer la dérivation par rapport au temps par une dérivation par rapport à  $a_1$ , c'est à dire l'abscisse curviligne. En utilisant les notations  $m_3 = \frac{m_2}{m_1}$  et  $a'_i = \frac{da_i}{da_1}$ , la forme chaînée devient :

$$\begin{cases} a'_1 = 1 \\ a'_2 = a_3 \\ a'_3 = m_3 \end{cases} \quad (2.44)$$



Les deux dernières équations de (2.44) constituent un système linéaire. De plus, les équations différentielles étant établies par rapport à  $a_1$ , les performances de la loi de commande seront théoriquement indépendantes de la vitesse du robot (tant que le temps de réponse des actionneurs et les effets dynamiques demeurent négligeables).

Afin de contrôler l'écart latéral, un choix judicieux pour  $m_3$  est (2.45). En effet, cette expression conduit à la dynamique d'erreur (2.46), qui implique que  $\epsilon^y = a_2 - y^d$  converge vers zéro, ainsi que  $a_3$  vers  $y^d$  soit 0 si la consigne  $y^d$  est constante.

$$m_3 = \frac{m_2}{m_1} = -K_d(a_3 - y'^d) - K_p(a_2 - y^d) \quad (K_d, K_p > 0) \quad (2.45)$$

$$\Rightarrow \epsilon''^y + K_d \epsilon'^y + K_p \epsilon^y = 0 \quad (2.46)$$

où  $y'^d$  est la dérivée de la consigne en écart latéral  $y^d$  par rapport à l'abscisse curviligne  $a_1$  et la dérivée seconde de la consigne est négligée ( $y''^d = 0$ ). Le suivi de trajectoire est ainsi réalisé. De plus, puisque l'équation de la dynamique d'erreur (2.46) est écrite en fonction de  $a_1$ , les gains ( $K_p, K_d$ ) permettent de spécifier une distance de réponse au lieu d'un temps de réponse. En pratique, le choix  $K_p = \frac{K_d^2}{4}$  est réalisé afin d'obtenir un amortissement critique  $\xi = 1$ . Finalement, l'inversion de (2.45) nous donne l'expression de la loi de commande pour les roues avant :

$$\delta_F = \arctan \left\{ \tan(\delta_R + \beta_R) + \frac{L}{\cos(\delta_R + \beta_R)} \left( \frac{c(s) \cos \tilde{\theta}_2}{\kappa} + \frac{A \cos^3 \tilde{\theta}_2}{\kappa^2} \right) \right\} - \beta_F \quad (2.47)$$

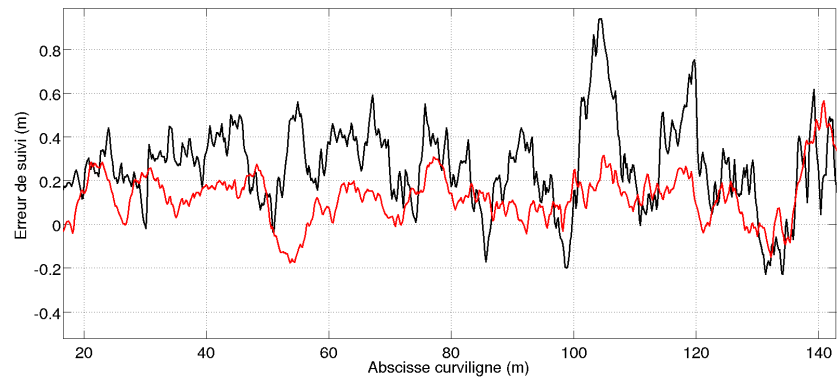
avec :

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_2 = \tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R \\ \kappa = 1 - c(s) y \\ A = -K_p \epsilon^y - K_d \kappa \eta + c(s) \kappa \tan^2 \tilde{\theta}_2 \\ \eta = \left( \tan \tilde{\theta}_2 - \frac{y^d}{v \cos \tilde{\theta}_2} \right) \end{cases} \quad (2.48)$$

Avec la commande (2.47), l'écart latéral  $y$  converge vers  $y^d$  de même que  $\tilde{\theta}_2$  converge vers 0. La loi de commande (2.47) permet, associée avec l'observation des glissements (2.21), d'obtenir un bon résultat de suivi de trajectoire sur sol glissant. A titre d'exemple, la figure 2.21 montre le résultat de suivi obtenu lors du suivi d'une ligne droite perpendiculaire à la ligne de plus grande pente sur un champ incliné.



(a) Robot en pente



(b) Erreur de suivi

FIGURE 2.21 – Résultat d'essais sur un robot à un train directeur en pente

Dans ce cas, l'angle de braquage arrière est nul par conception (le véhicule n'a qu'un train directeur). Le suivi est donc effectué en utilisant la commande (2.47) avec  $\delta_R = 0$  et le cas

particulier du suivi de trajectoire ( $\dot{y}^d = y^d = 0$ ) à la vitesse de 5km/h. Sur la figure 2.21(b) les écarts obtenus sont représentés en trait rouge. La courbe noire représente le résultat obtenu lors d'un suivi précédent en utilisant une loi de commande classique de suivi de trajectoire, c'est-à-dire, en ne tenant pas compte de l'adaptation (i.e.  $\beta_F = \beta_R = 0$ ). On peut ainsi constater que l'erreur de suivi est très proche de zéro tout le long du suivi (en tout cas inférieure à 20 cm), en comparaison avec la loi de commande classique qui admet une erreur se stabilisant autour de 35 cm avec des crêtes jusqu'à 80cm. Ces bons résultats ont été confirmés par de nombreuses expériences sur différents types de terrains et de robots. On notera que le même type de commande adaptative a été appliqué à des robots mobiles routiers évoluant lentement. Dans de tels cas, l'adaptation permet de compenser des erreurs d'étalonnage sur le bas niveau. L'observateur (2.21) interprètera en effet une erreur entre l'angle de braquage réel et mesuré comme un glissement de la roue sur le sol, et ajustera les dérives afin de compenser cette erreur.

L'application de la loi de commande (2.47) sur des trajectoires présentant de fortes variations de courbure ne permet pas d'obtenir un suivi très précis en tout point de la trajectoire de référence. Les temps de réponse des actionneurs, même à vitesse réduite créés des dépassements importants à chaque variation de courbure. Ce fait est particulièrement marqué sur le tracteur robotisé puisque l'actionnement de l'angle de braquage est assuré par un système hydraulique, particulièrement lent. Ainsi, avec le même véhicule que précédemment, sur un terrain de même nature, mais en suivant la trajectoire décrite sur la figure 2.22(a), l'erreur de suivi obtenue avec la loi adaptative seule est reportée en trait interrompu rouge sur la figure 2.22(b)

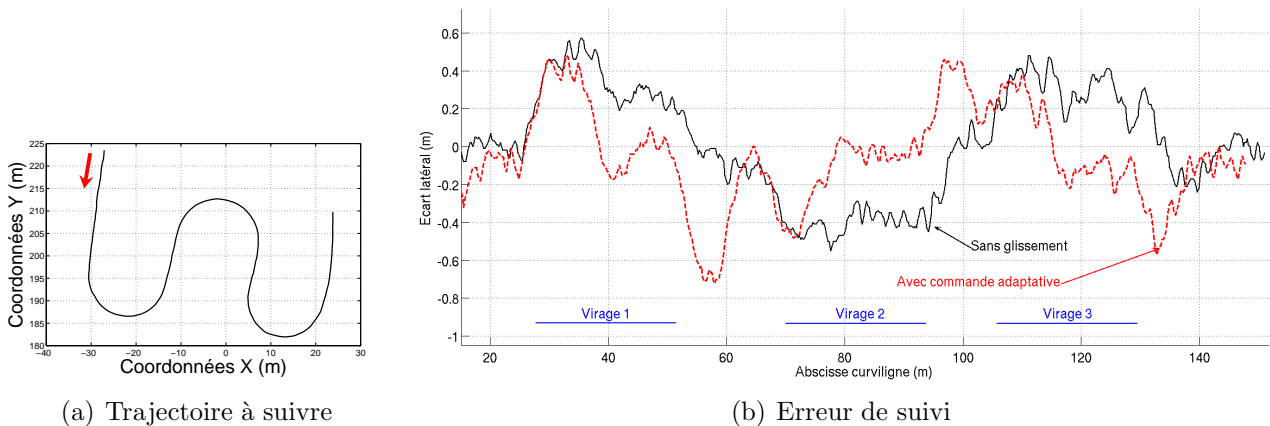


FIGURE 2.22 – Résultat d'essais avec commande adaptative sur un robot à un train directeur

Il peut être constaté qu'en régime permanent (courbure constante), l'erreur converge bien vers  $y^d = 0$ , à la différence de l'écart obtenu avec une loi classique (en trait plein noir), qui converge vers des écarts non nuls durant les virages (autours de  $\pm 40$ cm) sous l'effet des glissements non pris en compte. Toutefois, à chaque transitoire (i.e. abscisse curviligne 30, 50, 70, 100, 110 et 130 mètres), l'erreur de suivi avec la commande adaptative admet des dépassements importants, liés au temps de réponse des actionneurs, qu'il convient donc de considérer.

**Commande prédictive** Comme souligné ci-avant, si la commande adaptative permet de prendre en compte les glissements latéraux, et ainsi de conserver une bonne précision malgré les faibles conditions d'adhérence, cette précision n'est assurée que si la trajectoire ne présente que des variations limitées de courbure. Pour préserver la précision en régime transitoire, il est nécessaire de prendre en compte le temps de réponse des actionneurs, ce qui est réalisé par

l'intermédiaire de commande prédictive à modèle en tenant compte de la courbure future. En considérant l'expression de la loi de commande (2.47) du train avant, toujours en considérant  $v$  et  $\delta_R$  comme des paramètres mesurés, il est possible de décomposer cette expression en deux termes :

$$\begin{cases} \delta_F = \delta_{Traj} + \delta_{Deviation} \\ \delta_{Traj} = \arctan(u_p) \\ \delta_{Deviation} = \arctan\left(\frac{v_p}{1+u_p v_p + u_p^2}\right) - \beta_F \end{cases} \quad (2.49)$$

où :

$$\begin{aligned} u_p &= \frac{L}{\cos(\beta_R + \delta_R)} c(s) \frac{\cos \theta_2}{\kappa} \\ v_p &= \frac{L}{\cos(\beta_R + \delta_R)} A \frac{\cos^3 \theta_2}{\kappa^2} + \tan(\beta_R + \delta_R) \end{aligned} \quad (2.50)$$

Dans la reformulation (2.49) de la loi de commande, les deux termes  $\delta_{Traj}$  et  $\delta_{Deviation}$  jouent des rôles très différents :

- $\delta_{Deviation}$  (terme nul en l'absence d'erreur de suivi et de glissement) : ce terme permet d'asservir l'erreur de suivi à zéro compte tenu des écarts enregistrés et du glissement estimé. Les glissements et écarts générés par des phénomènes non modélisés n'étant pas prévisibles, il est totalement inutile d'intégrer ce terme dans un algorithme prédictif. Celui-ci restera donc inchangé par l'algorithme de prédiction.
- $\delta_{Traj}$  (terme non nul en l'absence d'erreur de suivi et de glissement) : Ce terme dépend majoritairement de la courbure de la trajectoire à suivre. Celui-ci assure l'égalité entre la courbure de la trajectoire et la courbure du véhicule. Sachant que la trajectoire est totalement connue, l'algorithme de prédiction remplacera ce terme, avec comme objectif la convergence de la courbure du véhicule vers la courbure de la trajectoire.

Ainsi, l'algorithme prédictif s'appliquera uniquement à la composante  $\delta_{Traj}$  associée à l'asservissement de la courbure du véhicule à la courbure de la trajectoire, comme représenté sur le schéma de la figure 2.23. Une fois cette séparation effectuée, appliquons l'algorithme de com-

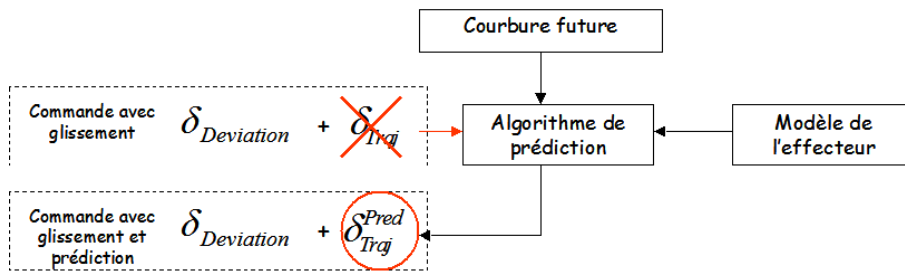


FIGURE 2.23 – Algorithme de suivi avec prédiction et glissement

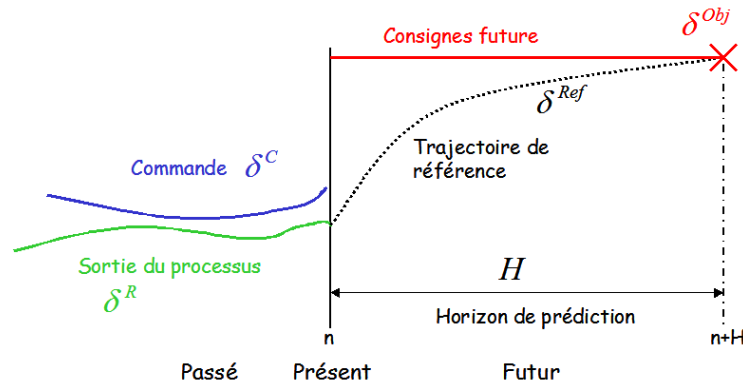
mande prédictive fonctionnelle défini dans [Ric93] au terme  $\delta_{Traj}$ , afin de calculer un terme prédictif associé, noté dans la suite  $\delta_{Traj}^{Pred}$ . Celui-ci utilise les notations suivantes, s'articulant autour du schéma 2.24(a) :

- $\delta^C$  : Commande envoyée à l'actionneur. Dans le cas présent où une séparation de la loi de commande a été réalisée, il s'agit uniquement de la partie "trajectoire" ( $\delta_{Traj}$ ) définie par (2.49).
- $\delta^R$  : Angle de braquage mesuré. Cette variable constitue la sortie du processus, soit classiquement l'angle de braquage mesuré, en réponse à la commande  $\delta^C$  envoyée à l'effecteur.

- $H$  : Horizon de prédiction. C'est le temps (constant dans notre cas) dans le futur sur lequel est appliqué l'algorithme de prédiction. Dans le cas discret qui nous occupe, l'horizon de prédiction est choisi comme un entier ( $n_H$ ) correspondant au nombre d'itérations nécessaires dans le futur, pour minimiser le critère quadratique.
- $\delta^{Obj}$  : Objectif (ou consigne) futur à l'horizon  $H$ . C'est la valeur de la consigne future devant être atteinte par le véhicule calculée par l'intermédiaire de la courbure future ( $\delta^{Obj} = \arctan L \times \frac{c(s_H)}{c(s_H) + y^d(s_H)} + \tan \delta_R$ ).  $c(s_H)$  étant la courbure de la trajectoire au bout de l'horizon de prédiction et  $y^d(s_H)$  l'écart désiré à l'issue de cet horizon de prédiction.
- $\delta^{Ref}$  : Trajectoire de référence souhaitée pour atteindre la consigne finale  $\delta^{Obj}$ . Celle-ci, choisie par l'utilisateur, définit la dynamique souhaitée pour que le processus rejoigne la consigne future. Classiquement, on choisit ici un premier ordre comme dans la relation (2.51) où  $i \in [0; n_H]$  et  $\gamma_H \in [0; 1[$  est un paramètre permettant de définir la réactivité de la trajectoire de référence et donc de la commande :

$$\delta_{[n+i]}^{Ref} = \delta^{Obj} - \gamma_H^i \{ \delta^{Obj} - \delta_{[n]}^R \} \quad (2.51)$$

- $\hat{\delta}^R$  : Sortie prédite du processus. Cette variable constitue la réponse future du processus à une séquence de commande définie, connaissant le modèle d'évolution du processus.



(a) Schéma de base de la commande prédictive

FIGURE 2.24 – Schémas associés à la commande prédictive

Sous ces notations, il s'agit de trouver la commande à appliquer durant  $H$  permettant de minimiser l'écart quadratique entre la sortie prédite du processus  $\hat{\delta}^R$  et la trajectoire de référence  $\delta^{Ref}$ , ayant choisi une structure de commande au préalable. On applique ensuite au système la première valeur de la séquence calculée sur  $H$ . Ainsi, le terme prédictif se calcule en tant que solution du problème de minimisation (2.52)

$$\delta_{Traj}^{Pred} = \delta_{[n..n+n_H]}^{C \min} \sum_{i=0}^{n_H} \left\{ \hat{\delta}_{[n+i]}^R - \delta_{[n+i]}^{Ref} \right\}^2 \quad (2.52)$$

Dans notre cas, le comportement de l'algorithme prédictif est étroitement lié au choix de  $H$ . Intuitivement,  $H$  est donné par le temps de réponse du bas niveau. Toutefois, il est possible, en jouant sur cette valeur, d'augmenter l'effet anticipatif et de compenser dans une certaine mesure les effets des retards liés à l'inertie du véhicule. L'équation résultant de la minimisation (2.52) n'est pas détaillée ici (voir [LTCM07] pour plus de détails), et la solution est notée  $\delta_{Traj}^{Pred}$ . La loi de commande globale résulte ainsi de l'addition des termes utilisés dans la séparation, en

substituant le résultat de l'algorithme prédictif au terme associé à la trajectoire. Cette loi peut donc s'écrire comme suit :

$$\delta = \delta_{Traj}^{Pred} + \delta_{Deviation} \quad (2.53)$$

La loi de commande (2.53) permet effectivement de compenser les temps de réponses des actionneurs en anticipant les variations de courbure. La figure 2.25 reprend les mêmes conditions que le résultat présenté sur la figure 2.22, mais en appliquant la loi de commande adaptative et prédictive résumée par l'expression (2.53).

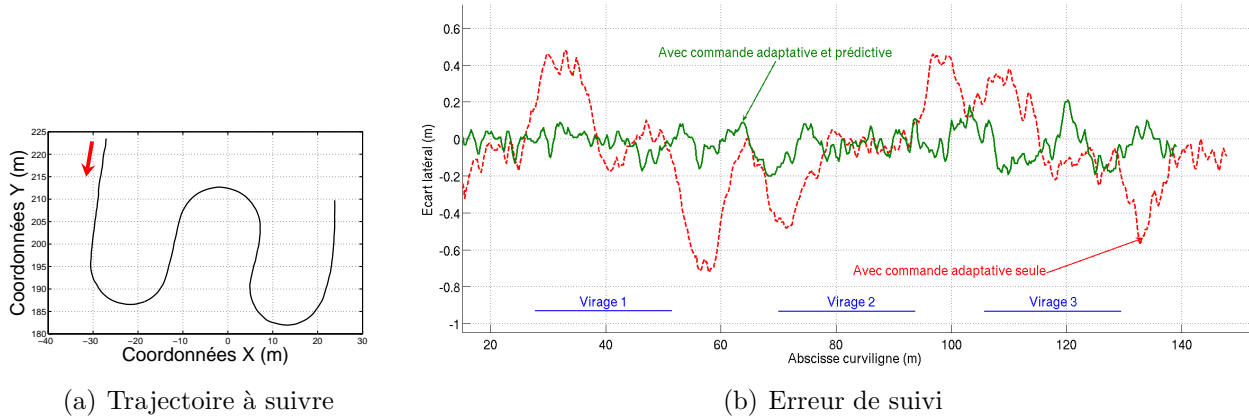


FIGURE 2.25 – Résultat d'essais avec commande adaptative et prédictive sur un robot à un train directeur

L'erreur de suivi ainsi obtenue est représentée en trait plein vert sur la figure 2.25(b), et comparée à l'erreur obtenue en utilisant la commande adaptative seule toujours en trait interrompu rouge. Il peut être constaté que les dépassements précédemment enregistrés à chaque variation de courbure ont été considérablement réduits, voire complètement effacés. L'erreur de suivi est donc très faible et demeure comprise entre  $\pm 15$ cm, quelles que soient les conditions d'adhérence et la trajectoire de référence choisie. La pertinence de ces résultats, dont la loi de commande est ici alimentée par ObsCin (2.21), demeure limitée à des vitesses relativement faibles (autour de 15km/H pour de faibles conditions d'adhérence), du fait du temps de réponse de l'observateur et de la seule prise en compte du temps de réponse des actionneurs dans la commande prédictive. Nous mettrons ce fait en lumière dans la section 2.3.3.3, et les adaptations nécessaires en plus du remplacement des dérives par l'estimation faite par ObsDyn.

Par ailleurs, dans les résultats précédents, le train arrière n'était, par conception, pas directionnel et sa valeur était donc naturellement nulle dans les algorithmes. Dans ce cas, seul l'écart latéral peut être commandé et la convergence de l'écart angulaire est laissée libre. Cependant, l'équation de convergence (2.46) montre que l'écart angulaire converge vers la somme de la dérive et l'angle de braquage arrière. En effet, la loi impose  $\hat{\theta}_2 \rightarrow 0$  et donc  $\tilde{\theta} \rightarrow -(\delta_R + \beta_R)$ . Ce fait est mis à jour par l'intermédiaire de la figure 2.26. Ici, la loi de commande adaptative et prédictive a été appliquée sur le robucar (voir annexe A) pour le suivi d'une ligne droite en pente (comme représenté sur la figure 2.26(a)) à 8km/h.

Le résultat sur l'erreur de suivi est comparable à celui obtenu lors de l'essai en pente avec le tracteur (voir figure 2.21), donc une précision inférieure à  $\pm 15$ cm. On note ainsi que le même algorithme est appliqué, seule la valeur de l'empattement  $L$  a été modifiée dans les équations

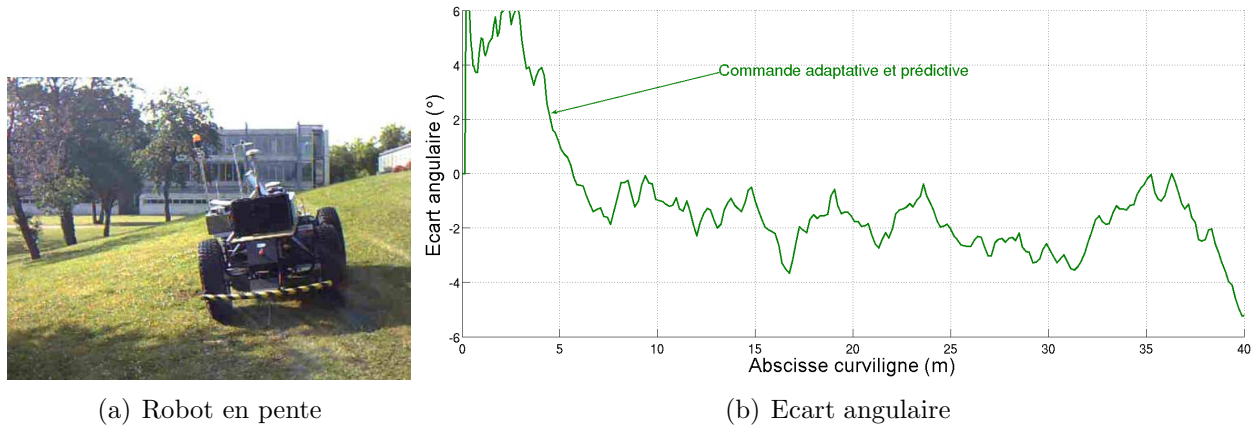


FIGURE 2.26 – Résultat sur l'écart angulaire avec un robot en bloquant le train arrière

de l'observateur ObsCin (2.21) et de la loi de commande (2.53). Dans ce cas de figure le robot est doté de deux trains directeurs, mais l'angle arrière a été maintenu à 0 ( $\delta_R = 0$ ). On note alors sur la figure 2.26(b) que l'écart angulaire est non nul et converge ici vers une valeur de  $-2^\circ$ , correspondant à la valeur de la dérive arrière observée. Pour aller plus loin et asservir l'écart latéral et l'écart angulaire, le contrôle de l'angle de braquage arrière constitue une possibilité naturelle.

### 2.3.2.2 Commande d'un robot à deux trains directeurs

Comme réalisé dans [WB93], il est possible de considérer le système (2.4) comme un système chaîné à 3 entrées ( $v$ ,  $\delta_F$  et  $\delta_R$ ), autorisant le contrôle de l'écart latéral et angulaire par l'intermédiaire des deux angles de braquage. Toutefois, une telle transformation pour la commande fait intervenir la dérivée de l'angle de braquage arrière  $\dot{\delta}_R$  en tant que variable d'entrée du système, nécessitant alors une intégration pour l'application sur les robots réels (classiquement actionnés en position sur les angles de braquage). Cette étape pouvant introduire du retard ainsi qu'un comportement oscillant, une stratégie alternative est ici proposée. Elle consiste à reprendre l'expression de la loi de commande (2.47) dans le modèle cinématique afin d'extraire la dynamique angulaire pour construire la loi de commande sur  $\delta_R$  et asservir spécifiquement l'écart angulaire vers une consigne notée  $\tilde{\theta}_{cons}$ .

En pratique, la commande adaptative et prédictive proposée par (2.53) permet d'asservir le robot en écart latéral en compensant les glissements et le retard des actionneurs. Ainsi, du point de vue comportemental, le système est équivalent à un système sans retard ni temps de réponse sur les actionneurs sous l'effet de la commande (2.47). Cette loi de commande permet la convergence de l'écart latéral pour toutes les valeurs atteignables par  $v$  et  $\delta_R$ . En réinjectant son expression dans l'équation gérant la dynamique angulaire (troisième équation du système (2.4)), la dynamique de l'écart angulaire sous l'effet de la commande du train avant est la suivante (en négligeant ici  $\dot{y}^d$  par souci de concision et en posant  $K_p = \frac{K_d^2}{4}$  comme imposé en pratique) :

$$\tilde{\theta}' = \left( -\frac{K_d^2 \epsilon_y}{4 \kappa} - K_d \tan \tilde{\theta}_2 + c(s) \tan^2 \tilde{\theta}_2 \right) \cos^2 \tilde{\theta}_2 \quad (2.54)$$

voir [CLTM08] pour les détails de calcul.

Comme mentionné précédemment, la loi de commande (2.47) impose que  $\tilde{\theta}_2 = \tilde{\theta} + \delta_R + \beta_R$  demeure proche de zéro. Ainsi, le terme  $\cos^2 \tilde{\theta}_2$  peut être considéré comme égal à 1. On obtient

alors :

$$\tilde{\theta}' = -\frac{K_d^2 \epsilon^y}{4 \kappa} - K_d \tan \tilde{\theta}_2 + c(s) \tan^2 \tilde{\theta}_2 \quad (2.55)$$

En étudiant (2.55), deux cas doivent être considérés selon la valeur de la courbure  $c(s)$ .

**Suivi de lignes droites :**  $c(s) = 0$  Dans ce cas, l'équation (2.55) devient :

$$\tilde{\theta}' = -\frac{K_d^2 \epsilon^y}{4} - K_d \tan \tilde{\theta}_2 \quad (2.56)$$

Une dynamique d'erreur  $\tilde{\theta}' = K_{d2} (\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})$  avec  $K_{d2} > 0$ , et par conséquent la convergence de  $\tilde{\theta}$  vers  $\theta_{cons}$ , peut facilement être imposée avec la loi de commande suivante :

$$\delta_R = -\beta_R - \tilde{\theta} + \arctan \left( \frac{-K_d \epsilon^y}{4} - \frac{K_{d2} (\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})}{K_d} \right) \quad (2.57)$$

**Suivi de trajectoires courbes :**  $c(s) \neq 0$  En posant  $X = \tan \tilde{\theta}_2$ , l'équation (2.55) devient :

$$-\tilde{\theta}' - \frac{K_d^2 \epsilon^y}{4 \kappa} - K_d X + c(s) X^2 = 0 \quad (2.58)$$

Si on pouvait imposer  $\tilde{\theta}' = K_{d2} (\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})$ , alors le discriminant de l'équation (2.58) s'écrirait :

$$\Delta = \frac{K_d^2}{\kappa} + 4 c(s) K_{d2} (\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta}) \quad (2.59)$$

Comme  $\kappa$  est supposé être toujours strictement positif, voir hypothèse (2.2), la condition  $\Delta > 0$  est toujours satisfaite en pratique. En effet, les plages de variation pour  $c(s)$  et  $y$ , et le choix fait pour  $(K_d, K_{d2})$  ne peuvent conduire à un discriminant négatif que lorsque l'écart  $|\tilde{\theta} - \tilde{\theta}_{cons}|$  devient supérieur à  $30^\circ$ , ce qui n'est jamais le cas en pratique. Ensuite, la racine  $X = \frac{K_d + \sqrt{\Delta}}{2c(s)}$  est une solution non valide par rapport aux limites de l'actionneur : le terme en  $K_d$  étant prépondérant, la valeur absolue de l'angle  $\tilde{\theta}_2$ , soit  $\delta_R$ , serait très importante. L'unique solution valide est ainsi  $X = \frac{K_d - \sqrt{\Delta}}{2c(s)}$ , conduisant à la loi de commande (2.60) pour les roues arrière :

$$\delta_R = -\beta_R - \tilde{\theta} + \arctan \left\{ \frac{K_d - \sqrt{\frac{K_d^2}{1-c(s)y} + 4 c K_{d2} (\tilde{\theta}_{cons} - \tilde{\theta})}}{2c(s)} \right\} \quad (2.60)$$

Les expressions (2.57) et (2.60) constituent les lois de commande des roues arrières pour le suivi de lignes droites et courbes. La continuité de ces expressions peut être établie par des calculs non présentés ici. Le temps de convergence de l'écart angulaire est conditionné par le choix du gain  $K_{d2}$ . Afin d'obtenir l'indépendance entre les dynamiques latérales et angulaires, il est nécessaire que la condition d'une vitesse de variation négligeable de l'angle de braquage arrière ( $\dot{\delta}_R = 0$ ) soit satisfaite. En effet, la loi de commande pour le braquage avant est construite sous cette hypothèse qui est satisfaite si le temps de réponse pour la convergence de l'écart latéral est inférieur à celui de l'écart angulaire. Les gains  $K_p$ ,  $K_d$  et  $K_{d2}$  doivent donc être réglés de manière à satisfaire cette condition.



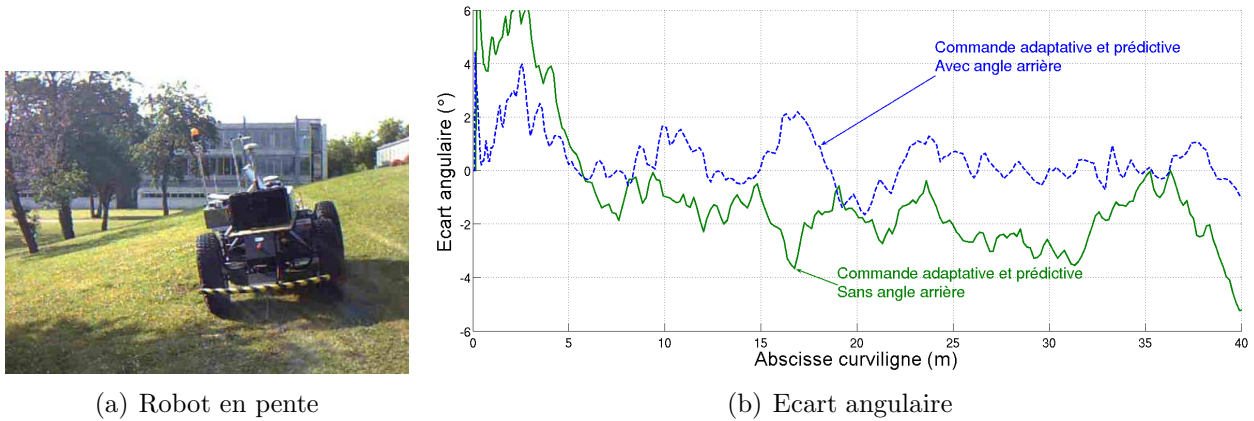


FIGURE 2.27 – Résultat sur l'écart angulaire en activant le train arrière

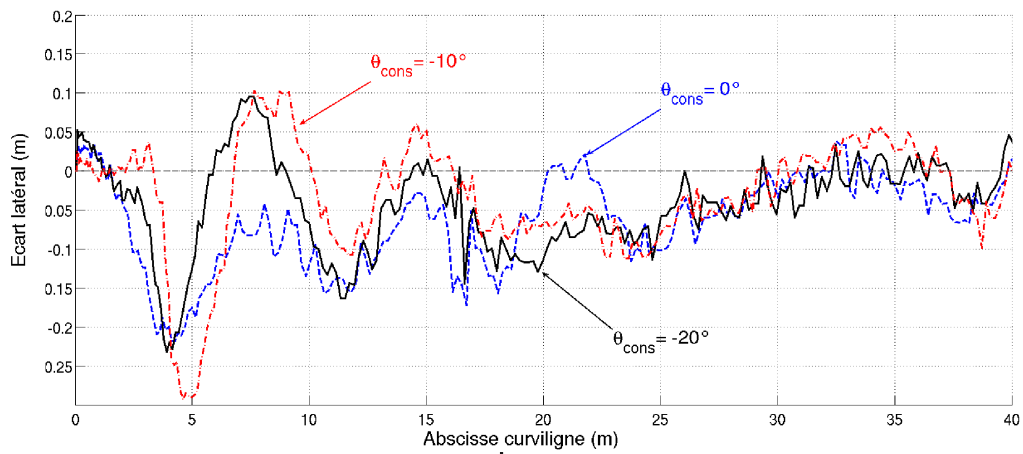
**Résultats** Afin de montrer la capacité à compenser la conduite en crabe, les mêmes conditions de suivi que celles décrites pour l'obtention de la figure 2.26 sont reprises en activant cette fois l'angle de braquage arrière avec les lois (2.57) et (2.60) en prenant une consigne nulle pour l'écart angulaire :  $\tilde{\theta}_{cons} = 0$ . Comme il peut être constaté sur la figure 2.27(b), l'écart angulaire lorsque le train arrière est activé (trait interrompu bleu) converge bien vers  $\tilde{\theta}_{cons} = 0$  au lieu de converger vers l'opposé de l'angle de dérive arrière. La compensation du glissement arrière est alors assurée par  $\delta_R$ . En effet, dans le cas du suivi de ligne droite, l'équation (2.57) montre que lorsque les erreurs sont nulles (dans le cas où  $\tilde{\theta}_{cons} = 0$ ), alors on obtient l'égalité  $\delta_R = -\beta_R$ .

Pour aller plus loin et montrer l'indépendance entre les dynamiques latérale et angulaire, la même trajectoire est suivie dans les mêmes conditions en imposant successivement des consignes d'écart angulaire différentes :  $\tilde{\theta}_{cons} = 0^\circ, -10^\circ, -20^\circ$ , dont les résultats sont présentés sur la figure 2.28 respectivement en trait interrompu bleu, en trait mixte rouge et en trait plein noir. En s'intéressant tout d'abord aux résultats relatifs aux écarts angulaires (figure 2.28(b)), on peut constater que ceux-ci convergent effectivement vers l'écart désiré après une phase transitoire d'environ 8m. On voit que l'erreur sur l'écart angulaire n'excède pas  $2^\circ$  malgré les variations de pente et de conditions d'adhérence. De plus, comme établi par l'expression de la commande (2.53) la modification de l'angle de braquage arrière ne perturbe que de façon limitée la dynamique latérale. La figure 2.28(a) montre qu'après la phase transitoire (après 8m) les écarts latéraux pour chaque valeur de  $\tilde{\theta}_{cons}$  sont superposés et demeurent très proches de zéro. Les écarts durant la phase transitoire sont liés au fait que le réglage des gains pour ces essais entraîne des distances de réponse trop proches (5m pour l'écart latéral et 8m pour l'écart angulaire). Malgré ce non respect relatif de l'hypothèse  $\dot{\delta}_R = 0$  nécessaire pour la loi de commande de l'angle de braquage avant, les erreurs de suivi restent très faibles, en comparaison avec les résultats obtenus en utilisant une loi de commande négligeant les glissements qui converge vers 35cm. Les résultats relatifs au suivi de trajectoires courbes sont comparables et sont analysés plus avant, avec d'autres, notamment dans [CLTB09].

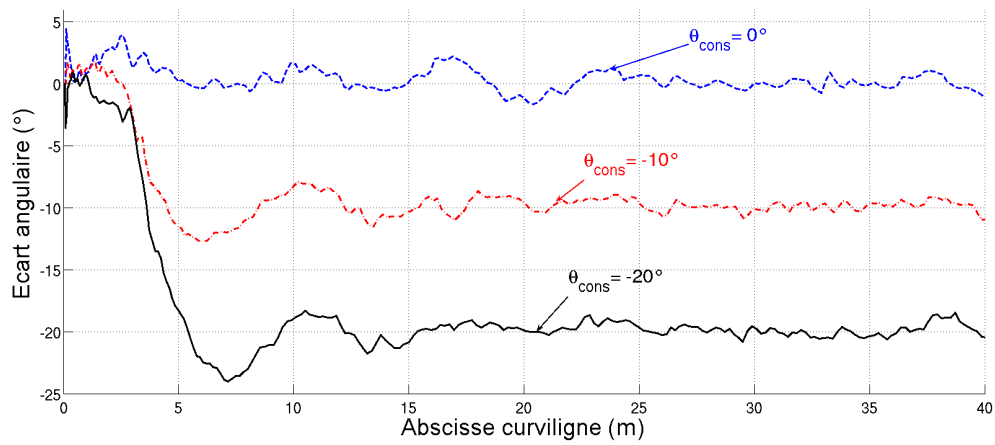
### 2.3.2.3 Commande d'un robot avec remorque

Comme il est montré précédemment, l'utilisation du modèle cinématique étendu associé à l'observation des dérives, permet de disposer d'un modèle homogène aux modèles classiques de





(a) Ecart latéral



(b) Ecart angulaire

FIGURE 2.28 – Résultats de suivi pour plusieurs valeurs de  $\tilde{\theta}_{cons}$

robots mobiles. Il est ainsi possible de commander l'angle avant pour le suivi de trajectoire ainsi que d'étendre au contrôle de l'angle arrière en s'appuyant sur la notion de systèmes chaînés. Il est bien sûr possible d'étendre plus loin cette chaîne et d'extrapoler la notion de modèle cinématique étendu aux systèmes à remorque. Ceci permet alors d'asservir un point quelconque au lieu du centre de l'essieu arrière d'un robot tracteur. Si la commande à  $n$  remorques est possible en s'appuyant sur les théories développées par exemple dans [Sam95], ou [LL07], l'exploitation directe des systèmes chaînés implique que les points d'attache des remorques soient situés aux centres des essieux. Ceci n'est que rarement réalisé en pratique, et un déport entre le centre de l'essieu arrière et le point d'attache est généralement présent. Aussi, une autre stratégie de commande est ici privilégiée.

**Modèle d'évolution de la remorque** Dans ces travaux, la notion de commande en cascade est ici étendue afin de considérer un point d'attache quelconque et de simplifier les équations d'observation des angles de dérive. Pour ce faire, le modèle cinématique présenté sur la figure 2.5 est généralisé au cas d'une remorque dont le point d'attache est déporté de la longueur  $L_2$  par rapport au centre de l'essieu arrière du robot tracteur. Dans ce point de vue, l'essieu de la remorque est vu comme une roue unique. Cette représentation reprend les notations précédentes

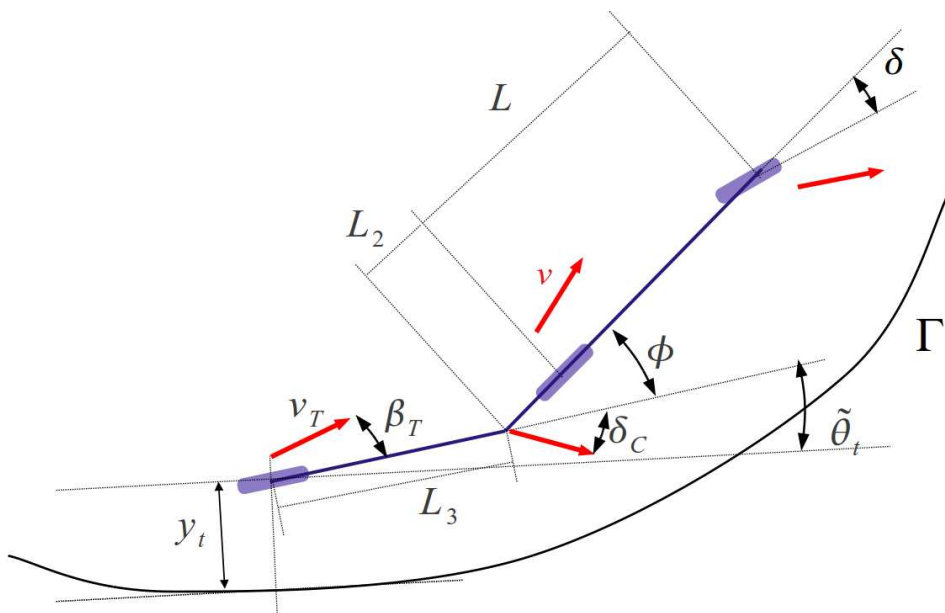


FIGURE 2.29 – Modèle cinématique étendu pour un robot avec remorque

auxquelles s'ajoutent les notations suivantes, représentées sur la figure 2.29 :

- $L_2$  et  $L_3$  sont respectivement les distances entre l'essieu arrière du robot tracteur et le point d'attache de la remorque et entre ce point et le centre de l'essieu de la remorque.
- $\phi$  est l'angle de brisure entre la remorque et le tracteur.
- $\beta_T$  est l'angle de dérive de la roue de la remorque représentative de son essieu.
- $y_t$  est l'écart latéral entre le centre de l'essieu de la remorque et la trajectoire de référence.
- $v_T$  est le vecteur vitesse au centre de la remorque.
- $\tilde{\theta}_t$  est l'écart angulaire entre l'orientation de la remorque et la tangente à la trajectoire au point le plus proche de  $\Gamma$  par rapport au centre de l'essieu de la remorque.

- $\delta_C$  est l'angle entre l'orientation du vecteur vitesse au point d'attache et l'orientation de la remorque.

Avec ces notations, le nouveau modèle cinématique étendu en considérant la remorque peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{s} &= v \frac{\cos(\tilde{\theta} + \beta_R)}{1 - c(s)y} \\ \dot{y} &= v \sin(\tilde{\theta} + \beta_R) \\ \dot{\tilde{\theta}} &= v [\lambda_1 \cos \beta_R - \lambda_2] \\ \dot{\phi} &= -\frac{v}{LL_3} [\lambda_3 \tan(\delta_F + \beta_F) + \lambda_4] \end{cases} \quad (2.61)$$

avec

$$\begin{cases} \lambda_1 &= \frac{\tan(\delta_F + \beta_F) - \tan \beta_R}{L} \\ \lambda_2 &= \frac{c(s) \cos(\tilde{\theta} + \beta_R)}{1 - c(s)y} \\ \lambda_3 &= L_3 \cos \beta_R + \frac{\cos \beta_R}{\cos \beta_T} L_2 \cos(\phi - \beta_T) \\ \lambda_4 &= L_3 \sin \beta_R + \frac{\cos \beta_R}{\cos \beta_T} [L \sin(\phi - \beta_T) - (L + L_2) \cos(\phi - \beta_T) \tan \beta_R] \end{cases} \quad (2.62)$$

en négligeant, par souci de concision, l'angle de braquage arrière ( $\delta_R = 0$ ).

Les dérivés du robot sont estimés par observation comme décrit dans la section 2.2. De même, il est nécessaire d'estimer l'angle de dérive de la remorque  $\beta_T$ , ce qui est réalisable de la même manière que précédemment. Il suffit de reformuler le système (2.61) sous la forme d'une équation d'état :

$$\dot{X}^R = f^R(X^R, \xi, u) \quad (2.63)$$

où

- $X^R = [y, \tilde{\theta}, \phi]^T$  est le nouvel état du système.
- $f^R(X^R, \xi, u)$  est une fonction définie par les trois dernières lignes de (2.61).
- $\xi = (\delta_F, v)$  contient les variables de commande, ici considérées comme des variables mesurées.
- $u^R = [u_1, u_2, u_3]^T = [\beta_F, \beta_R, \beta_T]^T$  est le vecteur contenant les angles de dérive à estimer et vu ici comme un vecteur de commande.

En considérant maintenant l'état observé  $X_{obs}^R$ , et en faisant l'hypothèse de petits angles de dérive, il est possible de réécrire (2.63) sous forme d'une représentation d'état linéaire en la commande :

$$\dot{X}_{obs}^R = f^R(X_{obs}^R, \xi, 0) + B^R(X_{obs}^R, \xi)u \quad (2.64)$$

où la matrice  $B^R$  est la dérivée partielle de  $f^R$  par rapport aux dérivés  $u$  évaluées en  $(0, 0, 0)$  et considérée comme inversible.

Comme pour le cas du robot tracteur seul dont l'expression d'estimation des dérivés est donnée par (2.21), l'estimation des trois dérivés en incluant la remorque est donnée par (2.65)

$$u^R = B^R(X_{obs}^R, \xi)^{-1} \left\{ G^R \cdot e^R - f^R(X_{obs}^R, \xi, 0) + \dot{X}_{mes}^R \right\} \quad (2.65)$$

avec  $X_{mes}^R$  le vecteur d'état mesuré,  $e^R = X_{obs}^R - X_{mes}^R$  l'erreur d'observation et  $G^R$  une matrice Hurwitz de gain permettant de régler la convergence de l'observateur.

**Synthèse d'un angle de braquage virtuel** Une fois les dérivées connues, le modèle (2.61) est entièrement accessible et peut être utilisé à des fins de commande. Pour ce faire, on considère la remorque comme un modèle bicyclette dont l'évolution est régie par le vecteur vitesse  $v_T$  et le vecteur vitesse au point d'attache dont l'orientation relative est donnée par  $\delta_C$  qui devient homogène à un angle de braquage virtuel, conditionné par les mouvements du robot tracteur. Ces considérations permettent d'écrire les équations d'évolution de la remorque (2.66) qui sont consistante avec le modèle (2.6), et pour lequel la synthèse d'un loi de commande pour le suivi de trajectoire est donnée par la démarche suivie à la section 2.3.2.1.

$$\begin{cases} \dot{s}_N &= v_t \frac{\cos(\tilde{\theta}_t - \beta_T)}{1 - c(s_N) y_t} \\ \dot{y}_t &= v_t \sin(\tilde{\theta}_t - \beta_T) \\ \dot{\tilde{\theta}}_t &= v_t [\bar{\lambda}_1 \cos \beta_T - \bar{\lambda}_2] \end{cases} \quad (2.66)$$

avec :  $\bar{\lambda}_1 = \frac{\tan \delta_C + \tan \beta_T}{L_3}$  ;  $\bar{\lambda}_2 = \frac{c(s_N) \cos(\tilde{\theta}_t - \beta_T)}{1 - c(s_N) y_t}$

Par analogie, la loi de commande pour  $\delta_C$  assurant la convergence de l'écart latéral  $y_t$  vers 0 est la suivante.

$$\delta_C = \arctan \left\{ \frac{L_3}{\cos \beta_T} \left( \frac{c(s_N) \cos \tilde{\theta}_2}{\kappa} + \frac{A \cos^3 \tilde{\theta}_2}{\kappa^2} \right) - \tan \beta_T \right\} \quad (2.67)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} \tilde{\theta}_2 &= \tilde{\theta}_t - \beta_T \\ A &= -K_p y_t - K_d \kappa \tan \tilde{\theta}_2 + c(s_N) \kappa \tan^2 \tilde{\theta}_2 \\ \kappa &= 1 - c(s_N) y_t \end{cases}$$

Pour lequel le même cheminement de commande prédictive que défini en section 2.3.2.1 peut être établi, afin de compenser le retard, non plus de l'actionneur, mais du temps d'établissement de  $\delta_C$  dépendant comme décrit ci-après du comportement du robot tracteur. L'expression de la loi de commande (2.67) régissant l'angle de braquage virtuel  $\delta_C$  constitue la première étape de la stratégie de commande. Il est maintenant nécessaire de contrôler le robot tracteur pour assurer la bonne orientation du vecteur vitesse au point d'attache.

**Commande du robot tracteur** Pour ce faire il est nécessaire de relier l'angle de braquage virtuel  $\delta_C$  avec l'angle de brisure de la remorque afin de définir la référence  $\phi_{ref}$  à atteindre. Cette relation est facilement déduite de considérations géométriques, ce qui donne :

$$\phi_{ref} = \delta_C + \beta_R + \arcsin \frac{L_2 \cos \beta_R \sin(\delta_C + \beta_T)}{L_3 \cos \beta_T} \quad (2.68)$$

A partir de cette référence, il faut alors définir l'angle de braquage  $\delta_F$  du robot tracteur permettant la convergence de l'angle de brisure  $\phi$  vers la référence  $\phi_{ref}$  calculée par (2.68). Ceci est réalisé en considérant la dernière équation du système (2.61), et en choisissant (2.69) comme loi de commande pour l'angle avant.

$$\delta_F = \beta_F + \arctan \frac{-\frac{LL_3 K_R (\phi_{ref} - \phi)}{v} - \lambda_4}{\lambda_3} \quad (2.69)$$

En effet, en considérant la fonction de Lyapunov candidate  $V = \frac{1}{2}(K_p y_t^2 + (\kappa \tan \tilde{\theta}_2)^2 + \epsilon^2)$  avec  $\epsilon = \phi_{ref} - \phi$ , sa dérivée par rapport à l'abscisse curviligne en injectant (2.69) est  $\frac{dV}{ds} = -K_d \kappa^2 \tan^2 \tilde{\theta}_2 - K_R \epsilon^2$ .  $\frac{dV}{ds}$  est bien négative en choisissant  $K_R$  positif, qui constitue ici le gain permettant de régler le temps de réponse pour la convergence de l'angle de brisure  $\phi$ .

**Résultats** Afin de valider le fonctionnement de la loi de commande en suivi de trajectoire de la remorque, le robot Arocco, associé à une remorque expérimentale (décrits dans l'annexe A et sur la figure 2.30), est utilisé dans le cadre d'un suivi de trajectoire en ligne droite sur un terrain en pente (perpendiculaire à la ligne de plus grande pente).



FIGURE 2.30 – Robot expérimental avec remorque

Durant cet essai, la vitesse d'évolution est de 5km/h et la remorque a été chargée avec un réservoir de 60L, au niveau de l'essieu arrière, entraînant un glissement important dans la ligne de plus grande pente. Durant le suivi, l'angle de dérive de l'essieu de la remorque ( $\beta_T$ ) atteint une valeur de  $10^\circ$ , tandis que les dérives avant et arrière du robot tracteur restent limitées à  $4^\circ$ . Ces résultats, non représentés ici sont détaillés dans [CLTM10] où de plus amples résultats sont commentés. Seuls les résultat concernant les écarts latéraux sont ici présentés sur la figure 2.31.

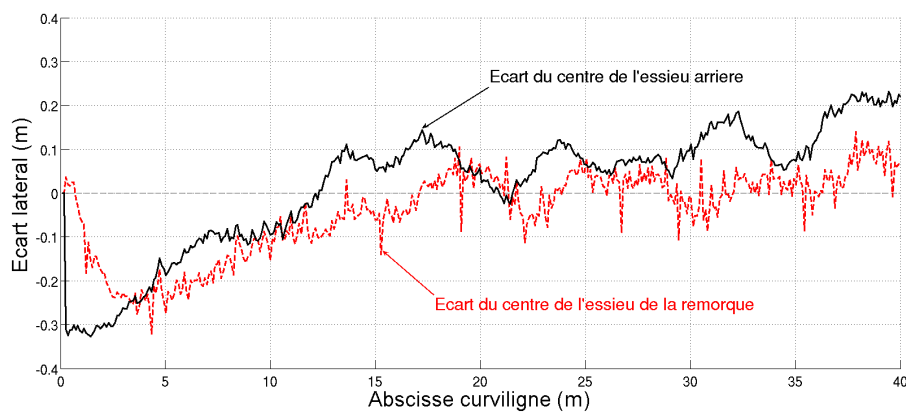


FIGURE 2.31 – Ecarts latéraux (robot tracteur et remorque)

Sur cette figure l'écart latéral du centre de l'essieu arrière du robot tracteur ( $y$  représenté en trait plein noir) est comparé avec l'écart du centre de l'essieu de la remorque ( $y_t$  en trait interrompu rouge). On remarque que l'écart de la remorque converge bien vers 0 grâce au calcul de l'angle de braquage virtuel (2.67), et la loi de commande (2.69), permettant la deuxième convergence (i.e. de l'angle de brisure  $\phi$  vers l'angle de référence  $\phi_{ref}$  assurant l'angle de braquage virtuel). Comme attendu, le robot tracteur évolue légèrement au-dessus de la trajectoire pour compenser la dérive de la remorque. La prise en compte des glissements est ici importante, puisque le fait de les négliger (en réalisant un suivi avec  $(\beta_F, \beta_R, \beta_T) = (0, 0, 0)$ ) mène à un écart de -30cm.

Pour aller plus loin, un essai dans les mêmes conditions, mais sur terrain plat et en suivant deux cercles successifs est proposé. La trajectoire à suivre ainsi que les trajectoires réellement suivies par le centre des essieux arrière et de la remorque sont tracées sur la figure 2.32(a). On note ainsi le déport du robot tracteur vers l'extérieur du virage pour permettre un suivi précis de la remorque. Cette précision se remarque plus facilement sur la figure 2.32(b) sur laquelle

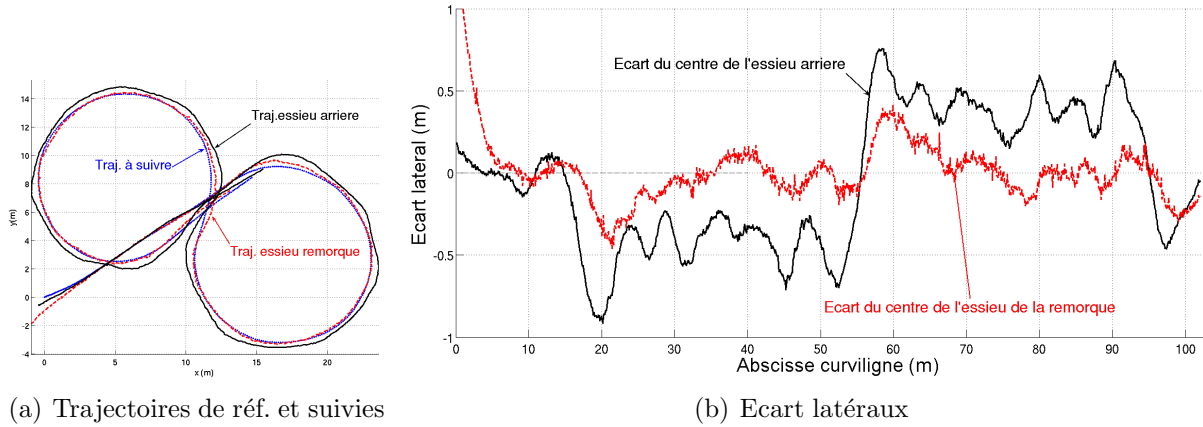


FIGURE 2.32 – Résultats de suivi pour plusieurs valeurs de  $\tilde{\theta}_{cons}$

les écarts latéraux sont tracés ( $y$  et  $y_t$ , respectivement en trait plein noir et interrompu rouge). On constate bien que pendant les deux cercles (de 15 à 50m puis de 55 à 95m), la position de la remorque converge avec une bonne précision vers la trajectoire, ce qui est rendu possible par le déport du centre de l'essieu arrière du robot tracteur. On constate qu'en dehors des régimes transitoires la précision atteinte est inférieure à 15cm, tandis que l'écart sans prise en compte des glissements converge vers -25cm et +25cm dans les mêmes conditions (voir [CLTM10] pour plus de détails).

Cette stratégie de commande, détaillée ici pour une remorque, peut aisément se généraliser à un train de  $n$  remorques, chacune d'entre elle ayant un angle de braquage virtuel, dont la convergence est assurée par l'angle de braquage (virtuel) de la remorque précédente, jusqu'au robot tracteur. De même, l'observation de l'angle de dérive sur chaque remorque peut être réalisée par l'intermédiaire de la même technique d'observation, en utilisant l'angle de brisure entre les remorques  $n$  et  $n - 1$ .

### 2.3.3 Gestion de la vitesse

#### 2.3.3.1 Planification et commande de demi-tour

Les développements présentés précédemment se placent dans le contexte d'un suivi de trajectoire à vitesse constante. Cette hypothèse n'est toutefois pas contraignante et la modification en ligne de la vitesse, compte tenu de sa mesure et l'indépendance du calcul des lois de commande vis-à-vis de cette variable ne doit pas perturber les performances. L'inversion de celle-ci peut même être envisagée sans modification. En revanche, son annulation crée une singularité dans les calculs de dérive par observation (voir (2.21) et (2.39)). Ainsi, la désactivation des observateurs à basse vitesse est nécessaire. Moyennant cette réserve, la génération de trajectoire et son suivi avec inversion de vitesse pour réaliser des demi-tours peut être envisagés, en conservant les mêmes lois de commande.

La stabilisation d'un robot mobile autour d'un point de fonctionnement a fait l'objet de nombreux travaux mais sa résolution demeure délicate. Il est en effet prouvé dans [Bro83] que la stabilisation d'un robot non holonome est impossible à obtenir par un retour d'état continu. Par conséquent, plusieurs travaux de recherche ont tenté de répondre à ce problème par des approches alternatives. Dans [CdWS92], [AS97] et plus récemment dans [Pou02], une commande discontinue (ou plus précisément continue par morceaux) est proposée, afin d'amener le robot mobile d'une configuration à une autre par le biais de configurations intermédiaires. Une approche utilisant une commande par modes glissants est également avancée, entre autres dans [GU94] : elle consiste à définir une trajectoire à suivre pour arriver à la configuration souhaitée (via l'utilisation d'une fonction de Lyapunov), puis de l'exécuter via une commande par modes glissants. La faiblesse de ces approches est que pour rallier deux configurations infiniment proches, le robot peut avoir une trajectoire ample à décrire, ce qui n'est guère satisfaisant sur un plan pratique (en plus du fait que les commandes sont discontinues). Une alternative à ces approches, permettant de préserver la continuité des commandes, consiste à envisager des retours d'état continus dépendant explicitement du temps (retour d'état instationnaire) comme dans [Sam93] ou [TL02]. La faiblesse de cette technique tient cette fois à ce que des comportements très oscillants peuvent alors être observés autour de la configuration souhaitée. La stabilisation sur une configuration fixe est donc possible d'un point de vue théorique, mais les performances demeurent peu convaincantes d'un point de vue pratique. Pour tenter d'apporter une solution plus satisfaisante la notion de stabilité pratique a récemment été introduite. L'objectif n'est plus de stabiliser le robot sur une configuration cible avec une précision infinie, mais d'amener son état dans un voisinage de cette configuration, voisinage dont on maîtrise la dimension. Pour adresser cette tâche, des techniques de commande par fonctions transverses (voir [MS00] et [SM05]) ont été introduites, avec pour objectif d'éliminer ou tout au moins de maîtriser le comportement oscillant du robot. Présentement, aucune de ces solutions n'apporte une réponse complètement satisfaisante et le problème de la stabilisation demeure ouvert. Toutefois, le passage par une vitesse nulle au voisinage d'un point est uniquement considéré dans ces travaux, sans chercher une précision déterminée. Les performances intrinsèques des commandes latérale et longitudinale donneront la précision au point d'arrêt.

**Planification de trajectoire** Comme réalisé dans [CLBT10], il s'agit ici de générer une trajectoire admissible par le robot ou le système robot et remorque, associée à un profil de vitesse. Les précisions atteintes par les lois de commande relatives au suivi de trajectoire et de vitesse sont alors considérés comme suffisantes pour amener le robot au voisinage d'un point d'arrêt désiré. Pour ce faire, on considère une trajectoire se terminant par un point noté  $B$  sur la figure 2.33.

En notant  $d$  une distance désirée pour repartir sur une autre trajectoire, il s'agit de planifier la trajectoire permettant de le rallier en minimisant l'espace utilisé pour ce demi-tour. A partir de cette distance le point à atteindre est construit et noté  $C$ . Afin de planifier une trajectoire admissible, les fonctions clothoides sont ici considérées afin d'assurer la régularité de la courbure de la trajectoire à suivre. Pour un robot seul (figure 2.33(a)), la planification est ainsi composée de deux arcs de clothoïde et de trois arcs de cercle dont le rayon est égal au rayon de braquage minimal du robot. Aux points d'arrêt  $S_1$  et  $S_2$ , les courbures peuvent être instantanément modifiées.

En ce qui concerne le système robot et remorque, la modification instantanée de courbure

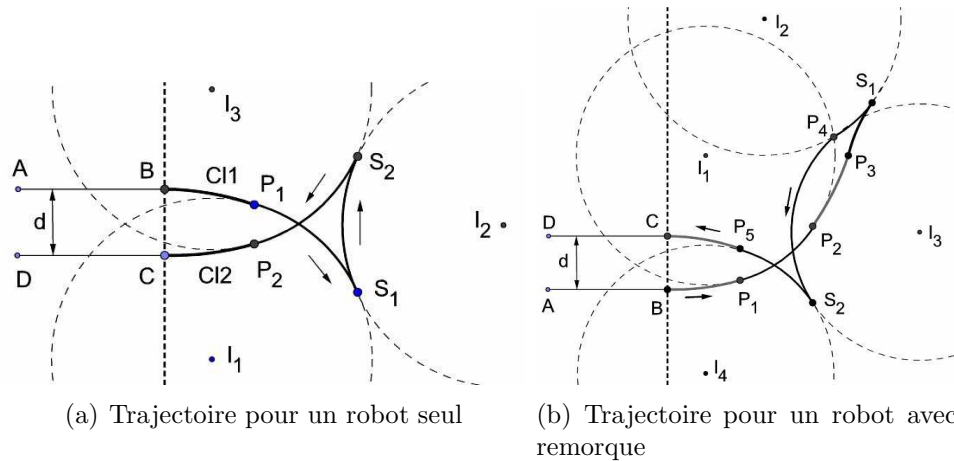


FIGURE 2.33 – Génération d'une trajectoire pour réaliser un demi-tour

aux points d'arrêt est impossible, nécessitant l'ajout de deux arcs de clothoïde par point  $S$  pour rallier une courbure nulle avant de s'arrêter. Dans ce cas la procédure de génération de demi-tour est la suivante

- Le premier mouvement de  $B$  à  $S_1$  est composé d'un arc de clothoïde  $BP_1$  permettant de modifier la courbure jusqu'à la courbure maximale, afin de suivre alors l'arc de cercle  $P_1P_2$ . Ensuite, un second arc de clothoïde  $P_2P_3$  pour ramener à une courbure nulle, suivi d'une dernière partie  $P_3S_1$  est nécessaire pour aligner le robot tracteur et la remorque.
- La marche arrière est alors générée, composée premièrement d'un arc  $S_1P_4$  pour accroître l'angle de brisure entre le tracteur et la remorque. Le point  $P_4$  est déterminé de manière à ce que le centre instantané de rotation de la remorque coïncide avec le centre instantané de rotation du tracteur. Quand l'angle de braquage du tracteur atteint  $20^\circ$ , les considérations géométriques montrent que l'angle de brisure atteint  $53^\circ$ . Ceci constitue une configuration stable permettant un mouvement circulaire, considéré ici comme un objectif. L'arc de cercle  $P_4S_2$  est alors construit.
- Le troisième mouvement est composé d'un arc de cercle  $S_2P_5$  et d'un arc de clothoïde  $P_5C$ .  $S_2$  est le second point d'arrêt, défini par l'intersection entre les cercles de centre  $I_3$  et  $I_4$ .

**Contrôle de la vitesse** La planification précédente définit uniquement la trajectoire permettant d'effectuer un demi-tour en prévoyant uniquement des points d'arrêt et une inversion de la vitesse d'avance sans se préoccuper d'une consigne sur celle-ci. Un profil de vitesse sur la trajectoire est alors déterminé pour arriver de façon progressive à vitesse nulle (i.e en respectant le temps de réponse des actionneurs gérant la rotation des roues). Un tel profil est illustré sur la figure 2.34.

Si ce profil tient des compte des capacités physiques des actionneurs, l'application directe du profil donné sur la figure 2.34 ne conduira pas au résultat désiré, étant donné le temps de réponse du bas niveau. Comme dans le cas de l'angle de braquage, un retard sera nécessairement présent. Aussi, comme le profil de vitesse, au même titre que la trajectoire est connu, l'application du principe de commande prédictive détaillé dans la section 2.3.2.1 est mis en œuvre. Par analogie avec la commande prédictive développée pour le cas de l'angle de braquage avant, l'objectif est ici - connaissant les caractéristiques du bas niveau - de calculer à chaque instant la commande



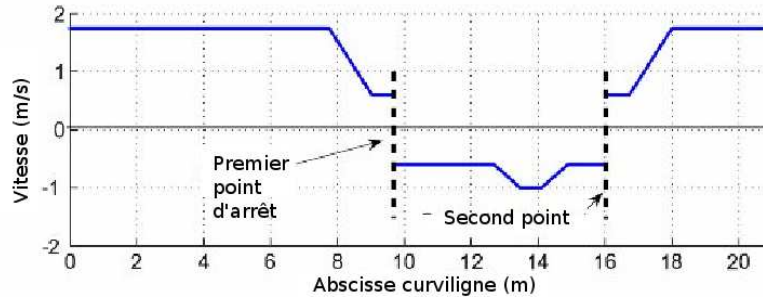


FIGURE 2.34 – Illustration du profil de vitesse choisi pour l'opération de demi-tour

en vitesse du robot permettant d'atteindre au mieux la consigne de vitesse au bout d'un horizon de prédiction  $h_L$  compatible avec le temps de réponse pour l'établissement de la vitesse. En notant  $C_t$  la vitesse envoyée au robot, dotée d'une vitesse  $V_t$ , l'objectif est de rallier la consigne future  $D_{t+h}$  à partir de  $V_t$  par l'intermédiaire d'une trajectoire désirée  $\xi$ . Cette trajectoire est classiquement définie par (2.70).

$$\xi_{t+i} = D_{t+h_L} - (D_{t+h_L} - V_t)\lambda^i \quad (2.70)$$

avec l'entier  $i \in [0..n_{h_L}]$  le  $i^{\text{eme}}$  point de coïncidence sur l'horizon de prédiction (le point  $n_{h_L}L$  correspondant à  $t+h_L$ ) et  $\lambda_L \in ]0, 1[$  un réel permettant de régler la convergence de la trajectoire. En identifiant l'actionneur en vitesse comme un premier ordre dont les paramètres sont  $\tau = 0.42s$  et  $K = 0.97$ , la sortie du modèle de bas niveau à l'instant  $t + h_L$  s'écrit :

$$q_{t+h} = V_t e^{-\frac{h}{\tau}} + C_t K (1 - e^{-\frac{h}{\tau}}) \quad (2.71)$$

Ainsi, à partir du comportement désiré sur  $h_L$  donné par (2.70) et de la connaissance du bas niveau (2.71), la commande en vitesse à envoyer à l'instant  $t$  permettant de rallier suivant  $\xi$  la consigne à l'instant  $t + h$  (assurant  $q_{t+h} = D_{t+h}$ ) est la suivante :

$$C_t = \frac{[D_{t+h_L} - V_t](1 - \lambda_L^h) + V_t(1 - e^{-\frac{h_L}{\tau}})}{K(1 - e^{-\frac{h_L}{\tau}})} \quad (2.72)$$

Ainsi, en appliquant  $C_t$  définie par (2.72) au lieu de  $D_t$  sur l'actionneur de vitesse, il est possible d'anticiper les variations de vitesse afin de compenser le temps de réponse des actionneurs. ceci permet à la vitesse longitudinale instantanée du robot  $V_t$  d'être plus proche de  $D_t$ .

**Résultats** A partir de la trajectoire générée par la planification réalisée selon la méthode présentée, les algorithmes de suivi de trajectoire (en écart, avec les lois (2.53) pour un robot seul ou (2.69) pour un robot avec remorque) ainsi que la poursuite en vitesse (commande (2.72)) peuvent être appliqués. Pour valider ces développements, le demi-tour d'un robot avec remorque (présenté en annexe A et sur la figure 2.30) est ici considéré. La trajectoire générée à partir du segment  $AB$  et en rentrant la distance  $d = 2m$  entre  $B$  et  $C$  est présentée sur la figure 2.35(a) en trait plein noir. Sur cette figure la trajectoire réellement empruntée par le centre de l'essieu arrière est représentée en trait interrompu bleu, montrant à cette échelle une bonne superposition entre la trajectoire consigne et celle réellement suivie.

Pour analyser plus avant la précision, la figure 2.35(b) représente l'erreur de suivi obtenue durant l'exécution automatique du demi-tour. On constate alors qu'après l'initialisation (après

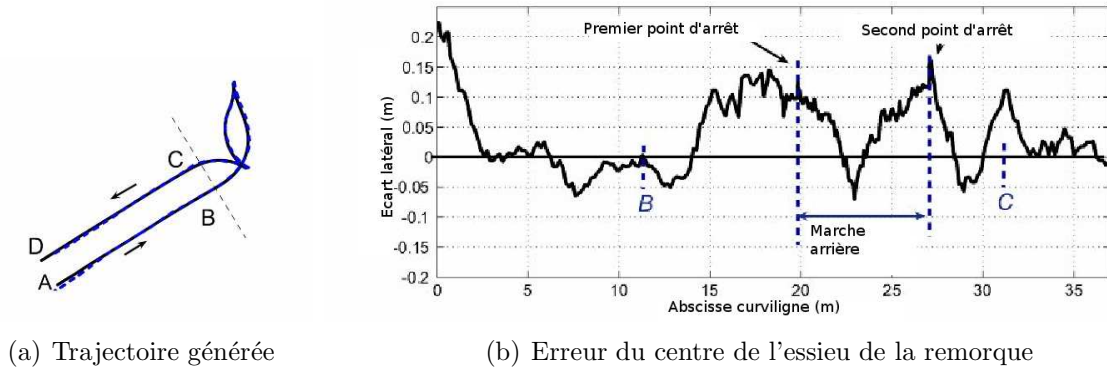


FIGURE 2.35 – Résultat de suivi pour un demi-tour avec remorque

5m), la précision de suivi est relativement importante puisque l'écart maximal à la trajectoire est inférieur à 15cm, ce qui reste très proche de ce qui est constaté dans le cas d'un suivi de trajectoire à vitesse constante. On note également que la précision est relativement indépendante de la vitesse. Elle est cependant légèrement dégradée à l'approche des points d'arrêt puisqu'à basse vitesse, les observateurs sont désactivés pour éviter les singularités.

Les variations de vitesse durant le suivi sont tracées sur la figure 2.36. Le profil de vitesse désiré est représenté en trait plein noir sur cette figure (vitesse consigne  $D(s)$ ), tandis que la vitesse réellement mesurée  $V(s)$  sous l'effet de la consigne  $C(s)$  calculée par la commande prédictive (2.69) est tracée en trait bleu.

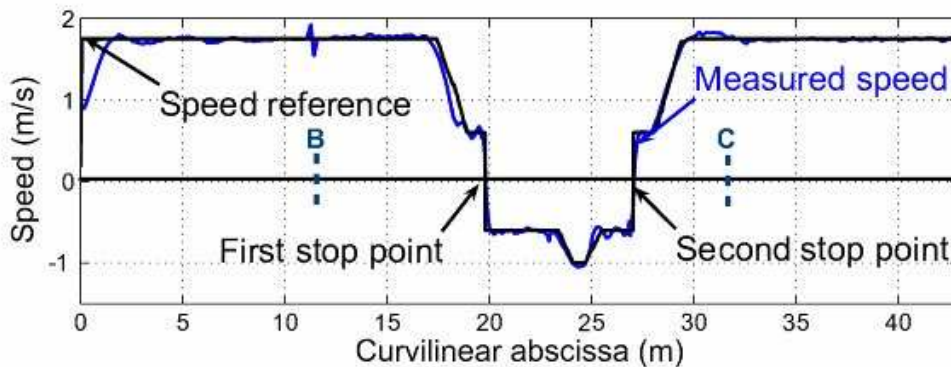


FIGURE 2.36 – Résultat de la poursuite en vitesse

On remarque ainsi que la vitesse réelle se superpose correctement avec le profil désiré. En effet, l'action anticipative permet de compenser le temps de réponse des actionneurs et donc de ne pas avoir de retard. C'est en particulier le cas aux points d'arrêt (abscisse curviligne 20m et 27.5m). Au niveau de ces points, pour lesquels le profil construit passe brutalement de 0.5m/s à -0.5m/s (et inversement pour le deuxième point), l'action prédictive permet de faire décroître la vitesse avant les sauts afin de faire coïncider la vitesse réelle à 0 en même temps que la consigne. Si plus de résultats sont analysés dans [CLBT10], l'essai présenté ici permet de démontrer les capacités des lois de commande vis-à-vis du cas du demi-tour. On montre en particulier ici l'indépendance entre le comportement longitudinal et latéral des algorithmes proposés, et l'analogie entre les principes de commande développés pour le suivi de trajectoire et la poursuite d'une vitesse.

### 2.3.3.2 Commande en formation d'une flotte de robots

**Philosophie de la commande en formation** Si le suivi d'un profil de vitesse afin de réaliser une opération de demi-tour est une application intéressante de la gestion de la vitesse, cette variation (hormis les cas étudiés plus loin pour préserver l'intégrité d'un robot), peut également être utilisée pour la poursuite d'un autre robot ou le contrôle en formation d'une flotte de robots. En effet, les principes de commande en trajectoire et en poursuite de vitesse sont généralisables au cas de la coopération multirobots, en conservant une trajectoire de référence comme support de définition d'une formation.



FIGURE 2.37 – Illustration de l'application

Le thème de la coopération entre plusieurs robots mobiles est largement étudié dans la littérature [BA98], [DOK98]. Que ce soit à des fins de perception [VCBSL11] ou pour exécuter des tâches complexes, plusieurs points de vue sont développés pour assurer la gestion d'une flotte (centralisé, décentralisé ou encore hybride) en fonction du degré d'autonomie pour chaque entité, de la nature de l'objectif poursuivi et dans une moindre mesure du nombre de robots considérés. Si on parle dans certains cas d'essaim de robots (ou *swarm robotics* [Sah04]) pour lesquels un haut degré d'autonomie pour chaque entité est nécessaire, nous considérons ici le cas de la commande en formation [FM04], [EUY08], limité à quelques entités. En considérant le contexte applicatif (illustré par la figure 2.37 et décrit du point de vue de l'application dans [BDLC]), l'objectif est ici de contrôler plusieurs robots de façon coordonnée et dans une configuration a priori fixe, mais pouvant varier pour adresser plusieurs phases d'une même tâche ou compenser des erreurs commises par des robots précédents. Plus précisément, il s'agit de parcourir une surface en maintenant des écarts relatifs entre les robots conformes à une configuration donnée et dans le respect d'une tâche globale.

#### Application des lois de commande développées au cas d'un système multi-robots

Cette philosophie est illustrée par la figure 2.38 qui généralise le point de vue du modèle cinématique étendu à la commande en formation de robots mobiles. Dans ce cas de figure, il s'agit de commander d'une part, l'écart latéral d'un robot  $i + 1$  et d'autre part, la distance le séparant d'un robot précédent  $d_i = s_{i+1} - s_i$ .

Pour ce faire, l'exploitation du découplage entre les dynamiques latérale et longitudinale rend directe l'exploitation de la loi de commande (2.53), puisque celle-ci permet d'intégrer un écart désiré  $y_{i+1}^d$  ainsi que sa variation. Toutefois la définition de cet écart peut être réalisée de deux façons :

- a. Par rapport à la trajectoire de référence  $y_{i+1}^d = d_{i+1}^y$ . Dans cette configuration, la position latérale du robot  $i + 1$  ne variera qu'en fonction de la consigne entrée et demeurera

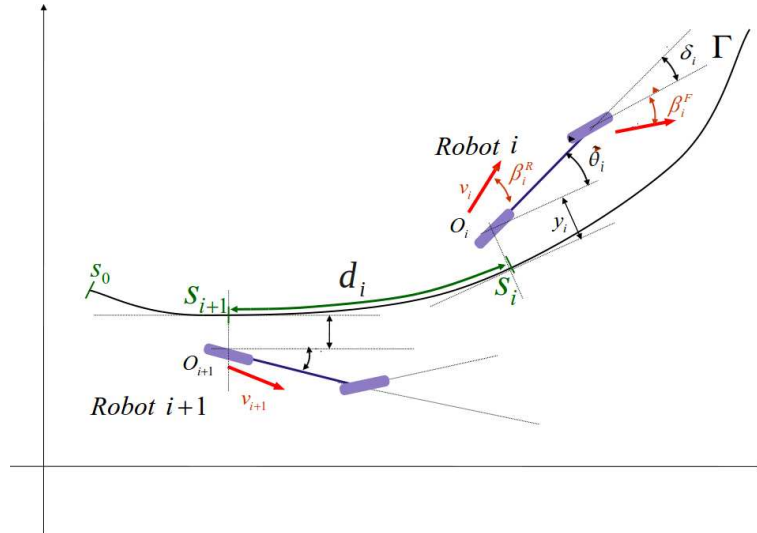


FIGURE 2.38 – Généralisation du modèle cinématique pour la commande de robots en formation

indépendante du comportement des autres robots. La formation est référencée par rapport à une trajectoire fixe.

- b. Par rapport à un autre robot (par exemple le robot précédent :  $y_{i+1}^d = d_{i+1}^y + \epsilon_i$ ). Dans ce cas, une distance latérale consigne  $d_{i+1}^y$  est définie par rapport à l'erreur commise par un autre robot  $\epsilon_i$ . Ceci permet de conserver une formation relative de la flotte, chaque robot se positionnant par rapport à un autre ou aux autres.

Dans la stratégie b., les petites variations potentielles risquent de se propager dans la flotte, alors que dans la stratégie a. la formation demeure insensible à de petites perturbations, mais ne garantit pas le maintien relatif de la flotte. En pratique, pour le contexte applicatif, une erreur mixte est définie de la façon suivante :

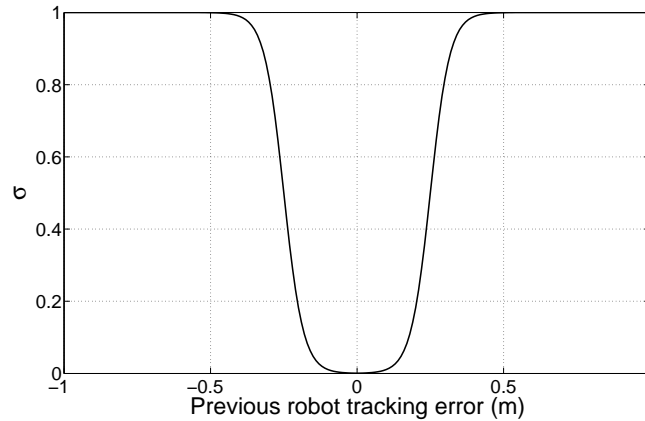
$$y_{i+1}^d(s_{i+1}) = d_{i+1}^y + \sigma(y_i) \epsilon_i \quad (2.73)$$

où  $\sigma$  est une fonction sigmoïde variant entre 1 et 0 en fonction de l'erreur commise par le robot précédent  $i$  suivant la courbe de la figure 2.39. Lorsque la valeur de  $\sigma$  est égale à 0, la stratégie a. est adoptée et lorsque cette valeur est égale à 1, la stratégie b. est mise en œuvre.

Grâce à la définition de l'écart (2.74) et de la sigmoïde donnée sur la figure 2.39, lorsque le robot précédent commet de petites erreurs, le robot  $i + 1$  ne les répercute pas, évitant des problèmes d'oscillation, tandis que si le robot précédent s'écarte de sa consigne (pour éviter un obstacle par exemple), le robot suivant répercute cette erreur pour maintenir le positionnement relatif de la flotte.

En ce qui concerne le contrôle longitudinal, l'objectif est d'asservir la vitesse du robot  $i + 1$  pour assurer une interdistance  $d_i$  entre le robot  $i$  et  $i + 1$ . Comme précédemment, deux stratégies sont possibles pour définir une distance longitudinale. Celle-ci peut être définie par rapport à un profil désiré ou donnée par un robot leader (notons  $d_{1,i+1}$  cette valeur), ou plus simplement par  $d_i$ . Comme dans le cas latéral, la première stratégie permet d'être robuste vis-à-vis de petites perturbations, tandis que la seconde permet de préserver le positionnement relatif. Cette stratégie, détaillée dans [BTMM05], est reprise ici afin de permettre la commande en vitesse du robot  $i + 1$  et mène pour le cas de deux robots à l'expression suivante de la vitesse :

$$v_{i+1} = \frac{1-y_{i+1}c(s_{i+1})}{\cos \tilde{\theta}_{2[i+1]}} \left( \frac{v_i \cos \tilde{\theta}_{2[i]}}{1-y_i c(s_i)} + K(s_{i+1} - s_i - d_i) \right) \quad (2.74)$$

FIGURE 2.39 – Exemple de la fonction  $\sigma$  utilisée

où  $i = 1$  et  $K^l > 0$  est un gain permettant de régler la dynamique longitudinale.

On note ici que la commande prédictive ne peut être appliquée sur l'ensemble de la commande en vitesse (le profil n'est pas connu à l'avance), mais peut toutefois être intégrée pour anticiper les variations de vitesse liées aux modifications de courbure (par exemple lorsque le robot  $i$  entre dans un virage à gauche avec un écart à gauche, celui-ci doit accélérer pour maintenir l'interdistance). Les lois de commande génériques de suivi de trajectoire sont directement applicables au cas de la commande de robots en formation, permettant de surcroît de prendre en compte les faibles conditions d'adhérence (les observateurs demeurent inchangés) et d'anticiper sur l'angle de braquage, au moins en ce qui concerne les variations de courbure.

**Résultats** La commande en formation d'une flotte de robots a été testée dans [LPT<sup>+</sup>10] sur des robots urbains avec des écarts désirés variables. Nous explicitons ici un résultat en milieu naturel afin de montrer la capacité à prendre en compte les conditions d'adhérence, en utilisant les robots Arocco et RobuFAST, décrits plus avant en annexe A et présentés sur la figure 2.40 dans la situation de commande en formation présentée ici.



FIGURE 2.40 – Robots en formation durant l'essai

Durant cet essai, le robot de tête évolue à une vitesse constante de 2m/s, avec la trajectoire



consigne définie en trait plein noir sur la figure 2.41(a). Cette trajectoire est réalisée en trois parties : une ligne droite en évolution perpendiculaire à la ligne de plus grande pente sur un terrain incliné de  $15^\circ$  (voir figure 2.40), un demi-tour sur le plat puis à nouveau une ligne droite sur une partie plate du sol. Durant ce suivi, la trajectoire réelle suivie par le robot leader et son écart latéral sont représentés en bleu sur la figure 2.41. Pour la coopération le second robot doit suivre le premier robot à une distance  $d_1 = 10m$  et un écart latéral constant  $y_2^d = 1m$ .

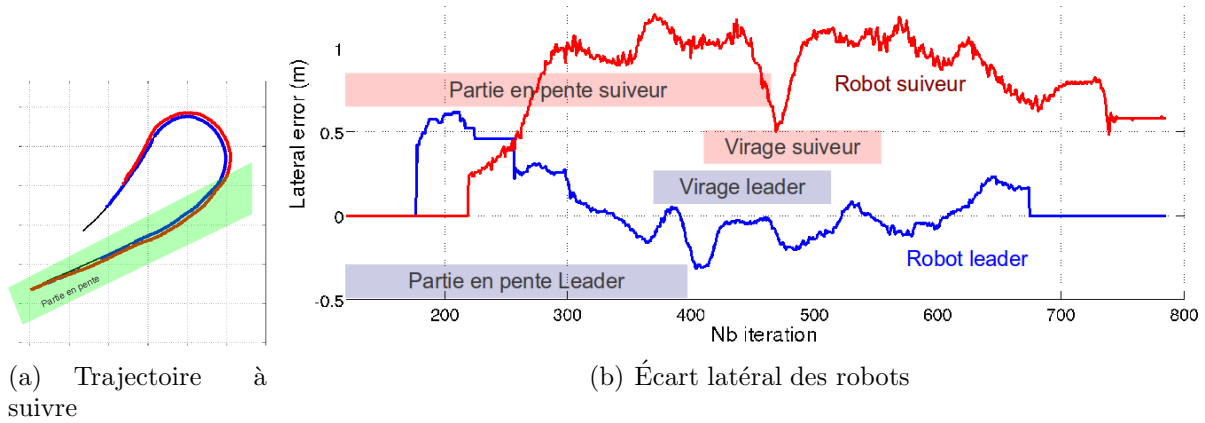


FIGURE 2.41 – Résultat de suivi en commande en formation

Les résultats relatifs au robot suiveur sont représentés en rouge sur la figure 2.41. On remarque ici que la précision de suivi est conforme aux résultats présentés précédemment puisque le robot leader comme le suiveur convergent vers leurs consignes d'écart latéral ( $y_1^d = 0$  et  $y_2^d = 1$ ) malgré les perturbations (pente et virage sur un terrain peu adhérent). On note toutefois des dépassements importants lors du retour sur la partie plate liés à la position en hauteur des antennes GPS donnant la position. Le dépassement sur le robot suiveur est plus important car la position de son antenne est plus haute créant un bras de levier plus important. Cet effet ne perturbe cependant pas les lois de commande et les observateurs, ce qui permet un retour rapide sur les valeurs consignes après la perturbation. Enfin, les pertes de précision enregistrées à la fin du suivi sont dues à la désactivation des observateurs à basse vitesse.

Concernant le comportement longitudinal de la formation, les vitesses enregistrées durant l'essai sont reportées en bleu pour le leader et en rouge pour le suiveur sur la figure 2.42. Sur cette figure, la distance entre les robots est tracée en trait noir. Après la phase transitoire (jusqu'à

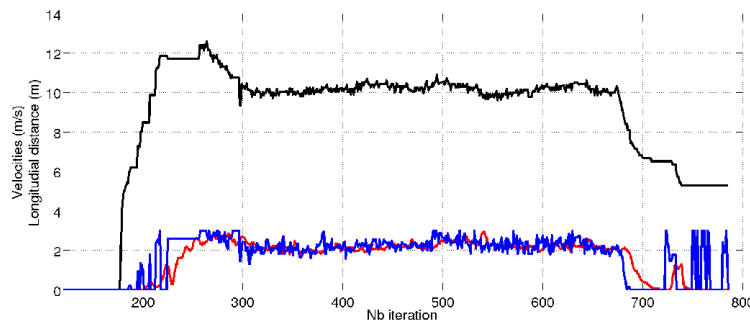


FIGURE 2.42 – Robots en formation durant l'essai

l'itération 250), liée à la différence des capacités d'accélération des robots, la distance converge

bien à 10m et demeure bien asservie autour de cette valeur. La réduction de cette distance à la fin du suivi est également liée à la différence de capacité de décélération entre les robots, ce qui peut être apprécié par les différences de temps de réponse sur les vitesses (courbes bleue et rouge).

### 2.3.3.3 Déplacements à haute vitesse

**Influence de l'accroissement de la vitesse sur ObsCin** Les résultats présentés dans les parties précédentes ont été obtenus par l'intermédiaire de l'observateur ObsCin (2.21) lors des tests à vitesse réduite, même en lorsque celle-ci est variable. Ainsi, les phénomènes dynamiques demeurent limités et les seuls retards influençant la précision sont liés principalement au temps de réponse du bas niveau, compensé par la commande prédictive.

Néanmoins, l'accroissement de la vitesse fait apparaître des phénomènes dynamiques non négligeables (forte non linéarité au contact pneu-sol, inertie du robot), qui perturbent le couple observateur cinématique et loi de commande générant alors des erreurs relativement importantes. Pour s'en convaincre, la trajectoire décrite en trait plein noir sur la figure 2.43(a) est suivie avec la loi de commande (2.53) successivement à 2m/s et à 4m/s sur un terrain plat mais peu adhérent (herbe humide). Les trajectoires réellement effectuées à 2 et 4 m/s sont reportées respectivement

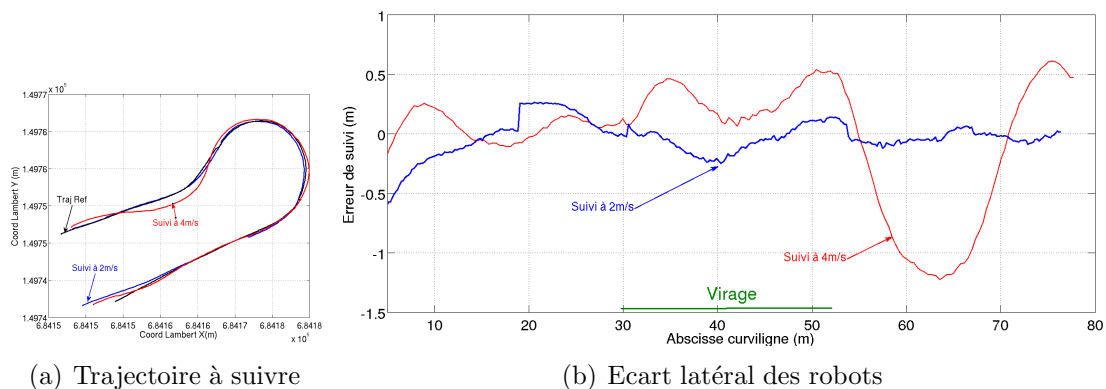


FIGURE 2.43 – Comparaison des écarts avec ObsCin en fonction de la vitesse

en bleu et rouge sur la figure 2.43(a) et les écarts de suivi correspondant de la même couleur sur la figure 2.43(b). Ce résultat met en évidence une dégradation importante de la précision de suivi à 4m/s. A cette vitesse, l'erreur de suivi atteint 1.2m (contre 15cm à 2m/s) à l'abscisse curviligne 65m. Cet endroit est particulièrement défavorable puisqu'il y a ici une inversion de courbure : la trajectoire présente un virage à gauche puis un brusque retour à droite pour revenir en ligne droite. Toutefois, même à l'entrée du virage un phénomène d'oscillation apparaît et l'erreur est déjà de 50 cm.

Ce comportement est lié principalement à deux phénomènes :

- Temps de réponse de l'observateur cinématique. L'estimation des angles de dérive par ObsCin étant uniquement basée sur un modèle cinématique, les effets dynamiques (et notamment les non linéarités) sont négligés, ne le rendant par essence efficace que lorsque les vitesses d'évolution sont suffisamment basses pour négliger ces effets. Ce temps de réponse crée l'effet d'oscillation durant le virage sur la figure 2.43(b).
- L'inertie du robot. Au regard des équations dynamiques (2.7), on peut constater que le temps de réponse entre l'envoi d'un angle de braquage constant et le moment où la vitesse

de lacet se stabilise n'est pas instantané et dépend des conditions d'adhérence, qui sont d'autant plus faibles que le robot évolue rapidement. Ainsi, un retard, venant s'ajouter au temps de réponse des actionneurs, est à prendre en considération. Cet effet est principalement responsable des dépassements enregistrés et particulièrement de l'écart important mis en évidence à l'abscisse curviligne 65m (-1.2m) sur la figure 2.43(b).

**Modification des lois de commande pour la haute vitesse** Pour contrer le premier effet, l'exploitation de la modélisation dans le cadre de l'observateur ObsDyn (2.39) et l'utilisation des dérivées  $\beta_R^{Dyn}$  et  $\beta_F^{Dyn}$  estimées par la stratégie décrite dans la section 2.2.2 permet d'améliorer la réactivité de l'estimation (voir le résultat mettant ce point en évidence sur la figure 2.14). Concernant le deuxième point, deux possibilités peuvent permettre de le prendre en compte :

- La première solution consiste à considérer ce retard supplémentaire de façon analogue à la prise en compte du temps de réponse du bas niveau. Auquel cas, il s'agit de modifier le temps de réponse des actionneurs pour être représentatif de ce phénomène. Toutefois, il est nécessaire de modifier ce modèle en considérant la variation des rigidités de dérive  $C_F$  et  $C_R$  qui influent sur ce temps de réponse. Ceci impose donc de recalculer toute la minimisation de la commande prédictive à chaque itération, avec le modèle de bas niveau adapté, ce qui alourdit les calculs.
- La deuxième solution est moins élégante et probablement moins précise, mais plus simple à mettre en œuvre. Il s'agit de modifier les paramètres de la commande prédictive (principalement l'horizon de prédiction) en fonction du temps de réponse calculé par l'intermédiaire du modèle dynamique et de l'adaptation des rigidités de dérive.

Les deux solutions pour la modification de la commande prédictive donnent des résultats similaires, aussi, la deuxième stratégie est adoptée par souci de simplicité. La loi de commande adaptative et prédictive reste formellement inchangée, mais la méthode d'estimation des dérivées est modifiée et l'horizon de prédiction est rendu variable.

**Résultats et mise en évidence des risques** La modification de la commande décrite précédemment permet d'améliorer de façon significative le résultat obtenu à 4m/s en reprenant les conditions de suivi précédentes et la modification sur les entrées de la loi de commande et les paramètres de la commande. Les courbes relatives à ce nouveau suivi sont reportées en trait magenta sur la figure 2.44.

La précision de suivi est ainsi considérablement améliorée puisque l'écart maximal au point le plus défavorable de la trajectoire est à présent inférieur à 50cm et la courbe d'écart nettement moins oscillante. Les modifications apportées permettent donc une plus grande réactivité et ainsi de conserver une grande précision de suivi malgré les faibles conditions d'adhérence et la vitesse. Toutefois, l'inversion de courbure à 65m est très pénalisante et, compte tenu du temps de réponse des actionneurs, risque de ne pas être admissible à plus haute vitesse.

En effet, le suivi dans les mêmes conditions mais à 5 m/s conduit aux résultats décrits sur la figure 2.45 sur laquelle la partie haute montre l'écart latéral tandis que sur la partie basse, l'angle de braquage avant envoyé au bas niveau est tracé.



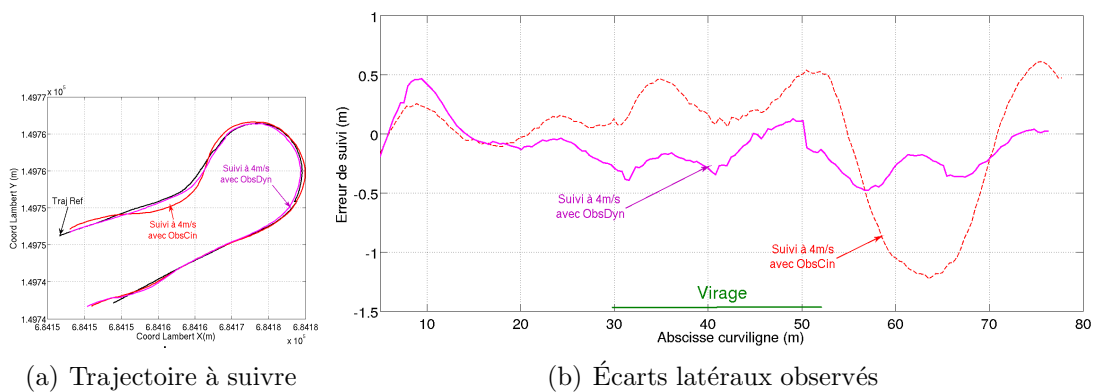


FIGURE 2.44 – Comparaison des écarts entre ObsCin et ObsDyn à vitesse élevée

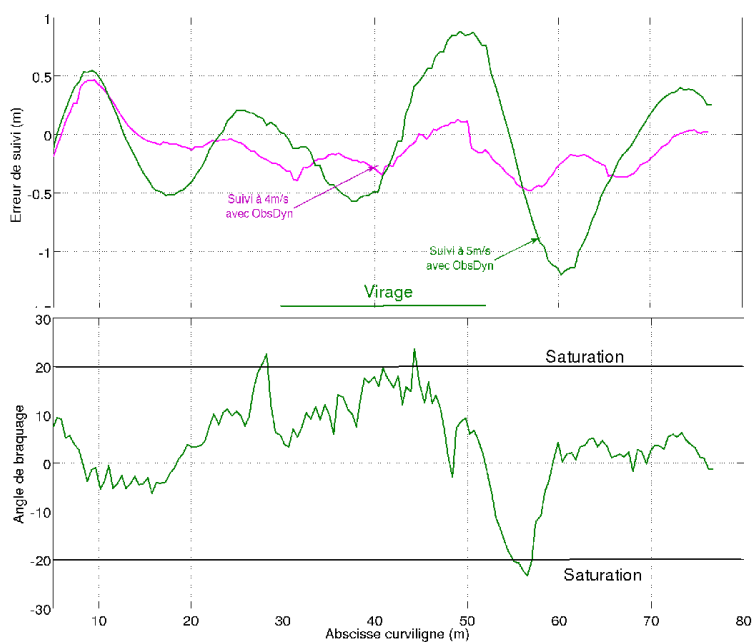


FIGURE 2.45 – Influence d’une saturation en braquage sur l’erreur de suivi

On constate que l'augmentation de la vitesse entraîne là encore une augmentation très importante de l'erreur. Toutefois, en considérant l'angle de braquage, on constate que les erreurs importantes, obtenues à 50 et 60m, correspondent aux moments où l'angle de braquage commandé dépasse en valeur absolue  $20^\circ$ , ce qui constitue la valeur de saturation de l'actionneur en angle de braquage. Cette trajectoire n'est donc plus admissible dans ces conditions et pour ce robot puisque, pour être suivie, un angle de braquage supérieur aux limites physiques est nécessaire. On rencontre alors une première limitation de l'algorithme de commande des déplacements : celui-ci ne vérifie pas l'admissibilité de la trajectoire en fonction des limitations physiques du robot.

Toutefois, en suivant une trajectoire admissible, de bons résultats à plus haute vitesse peuvent être obtenus. Si plusieurs types de sols sont testés dans [LTHM11] ou [LTCM10], nous présentons le suivi de la trajectoire définie sur la figure 2.41(a), à la vitesse de 6m/s, toujours avec le RobuFAST. Le résultat de suivi est nettement amélioré puisque l'écart maximal obtenu, après la phase d'initialisation, est inférieur à 50cm, et ce malgré la présence de la pente et du virage à cheval entre la pente et le plat. De plus l'écart maximal de 50cm à l'abscisse curviligne 45m correspond à la perturbation de l'antenne GPS liée au passage de la pente au plat. Sur la figure 2.46(a), une image extraite de la vidéo montre le robot au moment du passage de la pente au plat. Celui-ci est sur trois (voire deux) roues, présentant une situation critique pour sa stabilité.

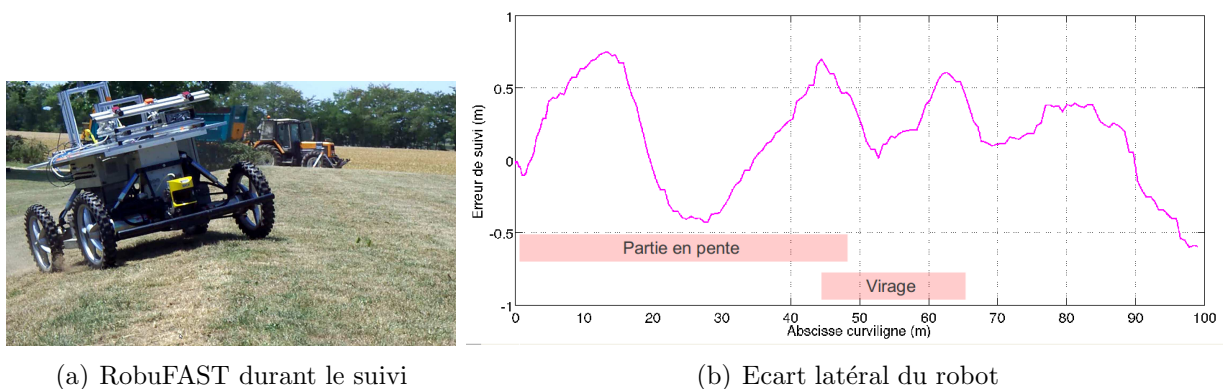


FIGURE 2.46 – Ecart obtenu sur une trajectoire pente/plat à 6m/s

Ceci montre une deuxième limitation de la commande des déplacements utilisée seule, la stabilité dynamique n'est pas gérée et le maintien sur la trajectoire peut amener à des actions sur les commandes conduisant à des situations dangereuses. Le risque de renversement ne constitue pas la seule atteinte à l'intégrité du robot. En effet, les faibles conditions d'adhérence peuvent mener à une perte de contrôlabilité pure et simple du robot. Ainsi la figure 2.47 illustre cette situation pour laquelle la trajectoire présentée en trait plein noir sur la figure 2.47(a) devait être suivie sur un champ de terre. L'algorithme de commande a été lancé à une vitesse de 7m/s, dont la trajectoire réellement suivie est représentée en trait rouge sur la figure 2.47, sur laquelle le tête à queue apparaît clairement. L'angle de braquage nécessaire pour le suivi de trajectoire a été envoyé trop brutalement, menant à une perte importante d'adhérence et en conséquence à la perte de contrôle. Ici, afin de réaliser le suivi de trajectoire, les commandes envoyées mènent à une perte trop importante d'adhérence, ce qui n'est pas vérifié dans le cadre d'une commande gérant uniquement les déplacements.

Au delà du tête à queue, la perte de contrôlabilité peut aussi intervenir dans le cas où le robot traverse une zone où la traction n'est pas suffisante, ou encore si la trajectoire passe par

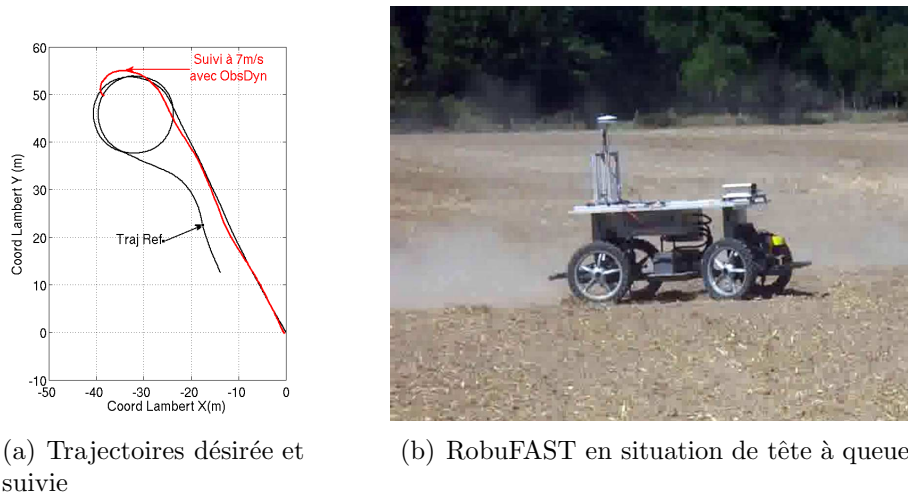


FIGURE 2.47 – Mise en évidence de la perte de contrôle

une zone non traversable (obstacle). On parle alors de critère de traversabilité, permettant de définir si le robot a la capacité physique de faire ce qu'on attend de lui.

**Limitations de la commande en suivi de trajectoire seule** Les résultats présentés dans cette section montrent que la stratégie de commande prédictive et adaptative permet une commande des déplacements avec une haute précision dans différents cas et pour différentes applications :

- Le suivi de trajectoire avec un seul train directeur à vitesse modérée ;
- Le suivi de trajectoire avec un deux trains directeurs à vitesse modérée ;
- Le suivi de trajectoire avec (au moins) une remorque ;
- La réalisation de demi-tour ;
- La commande en formation de plusieurs robots ;
- La commande d'un robot à haute vitesse.

On montre ainsi que les principes de commande développés autorisent la prise en compte de dynamiques variables et perturbant singulièrement le système considéré, tout en restant suffisamment flexibles pour adresser plusieurs applications et cas de figure. En outre, les phénomènes intervenant à haute dynamique sont pris en compte en utilisant des niveaux de modélisation restreints (ne nécessitant qu'un nombre limité de paramètres), et en exploitant des capacités d'anticipation. Les principes de commande proposés ici sont donc pertinents pour concevoir l'asservissement de systèmes dont l'interaction avec l'environnement génère des dynamiques importantes et incertaines.

Toutefois, les lois de commande proposées sont dédiées à un seul objectif (asservissement précis des déplacements), sans tenir compte des risques qu'elles peuvent générer sur l'intégrité du système. Dans le cadre de ces travaux, trois principaux risques de perte d'intégrité ont été mis en évidence, ne constituant pas une liste exhaustive :

- Le risque de renversement ;
- Le passage par des zones non traversables ;
- La saturation des actionneurs.

Afin de pouvoir aller plus loin, il est nécessaire de prendre en compte ces risques au sein de la commande pour garantir que les actions demandées pour suivre une consigne ne génèrent pas un

risque pour l'intégrité du robot. Afin d'accroître l'autonomie d'un robot mobile, il est nécessaire de prendre en compte cet aspect et de modifier les actions de commande pour préserver cette intégrité, ce qui est l'objet de la section suivante

## 2.4 Modération des actions de commande pour le maintien d'intégrité

Comme il a été montré dans la section précédente, les lois de commande proposées pour l'asservissement des déplacements d'un robot, dans un contexte de dynamique incertaine, permettent d'obtenir de bons résultats en terme de précision malgré les fortes perturbations. En revanche, les actions nécessaires sur le robot pour obtenir cette précision peuvent ne pas être atteignables (n'autorisant plus un asservissement adéquat) ou générer des situations dangereuses (renversement, perte de contrôle). Il apparaît donc que la seule gestion des déplacements n'est pas suffisante pour conférer un haut degré d'autonomie dans le contexte de ces travaux, et il convient de prendre en compte les capacités des robots à réaliser les consignes souhaitées.

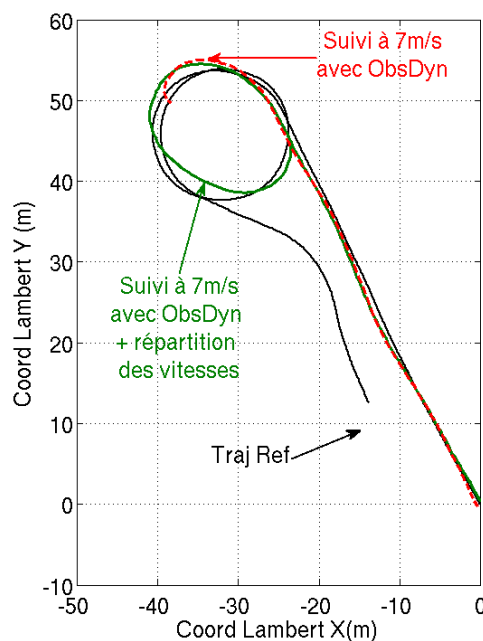


FIGURE 2.48 – Résultat de suivi obtenu avec gestion différenciée de répartition des vitesses de rotation

En ce qui concerne le cas des robots mobiles, il a été prouvé dans [SHR06], et plus particulièrement dans [LGSB08], qu'il était possible d'améliorer la stabilité dynamique en jouant sur la répartition des efforts longitudinaux (traction), soit plus concrètement sur la gestion différenciée des vitesses de rotation dans chacune des roues. Ces principes sont compatibles avec l'approche de commande des trains directeurs proposée dans la section précédente. Ainsi, dans [LLG<sup>+</sup>10], nous avons montré que la gestion différenciée de la vitesse des roues, associée avec les principes adaptatif et prédictif pour l'angle de braquage avant permettait de réduire le risque de perte de contrôle et d'augmenter les vitesses de suivi en conservant la stabilité dynamique et un haut degré de précision. L'effet est cependant limité et les mêmes risques se retrouvent en augmentant encore la vitesse. A titre d'exemple la figure 2.48, montre le résultat obtenu avec ce couplage dans les mêmes conditions que sur la figure 2.47. La stabilité est accrue, puisque le robot peut aller plus loin dans le suivi de la trajectoire, mais la perte de contrôle intervient tout de même un peu plus loin. Les capacités physiques des robots étant bornées, il est de toutes façons crucial

de veiller à les respecter, et il existe donc une limite sur la vitesse à laquelle les déplacements peuvent être effectués de façon sûre et stable. Cette limite n'est pas absolue et dépend de la trajectoire désirée, des conditions d'interaction et bien sûr des paramètres de conception du robot (géométriques, dynamiques, ainsi que des propriétés des actionneurs).

Compte-tenu de l'indépendance entre la dynamique longitudinale et latérale autorisée par les lois de commande des déplacements proposées dans la section précédente, la gestion de l'intégrité du robot est ici considérée par la limitation de la vitesse d'avance du robot. Il s'agit alors de déterminer la vitesse maximale en fonction du contexte (principalement l'environnement et les capacités du robot) qui rend le suivi d'une trajectoire admissible au sens de l'intégrité. Ce point de vue est exploité notamment par [ISS08] et [SKI07] dans une vision hors ligne, afin de faire la planification de trajectoire. Ceci implique une connaissance préalable parfaite de l'interaction entre le robot et son environnement qui est une hypothèse peu réaliste, conduisant à un comportement conservatif. La notion temps réel est ici privilégiée, puisque les conditions d'interaction avec l'environnement sont par essence fortement variables. Par exemple une trajectoire admissible à 5 m/s à un instant  $t$ , ne le sera plus une heure plus tard à cause de la variation des conditions d'adhérence. Aussi, cette dernière section est focalisée sur la limitation en temps réel de la vitesse, s'ajoutant à la commande des déplacements préalablement développée, afin de garantir l'intégrité au sens de deux critères : la stabilité dynamique (i.e. éviter le renversement latéral et dans une moindre mesure longitudinal) et l'admissibilité de la trajectoire (i.e. dans ce cadre, éviter la saturation des actionneurs).

## 2.4.1 Gestion de la stabilité dynamique

### 2.4.1.1 Principe de la limitation

Comme il a été montré à la section 2.2.3.2, il est possible par l'intermédiaire du modèle dynamique (2.14), alimenté par l'observateur (2.39) (et plus particulièrement par l'adaptation des rigidités de dérive (2.32)), d'estimer en temps réel une métrique représentative du risque de renversement latéral, le Transfert de Charge Latéral (précédemment noté  $TCL$ ). Comme réalisé dans [Bou09], étendu dans [RLTD11], et appliqué plus particulièrement au cas des robots mobiles dans [BLTM10], il est possible de relier la vitesse longitudinale d'un robot mobile et le risque de renversement, en fonction de l'état estimé du système. En effet, en reprenant les équations du modèle dynamique de roulis, l'évolution du  $TCL$  peut s'écrire, comme suit, en tenant compte de l'inclinaison de la masse suspendue :

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} &= \frac{1}{h}[h\dot{\gamma}^2\varphi + h\dot{\theta}^2\gamma + v_2\dot{\theta} + v_2\dot{\beta} + v_2\dot{\beta} - \frac{k_r\varphi + b_r\dot{\varphi}}{mh} + g \sin \alpha] \\ TCL &= -\frac{2}{c}h \sin \varphi \end{cases} \quad (2.75)$$

Avec ces équations simplifiées, le  $TCL$  dépend directement de l'angle d'inclinaison  $\varphi$  de la masse suspendue qui lui même dépend du carré de la vitesse longitudinale  $v_2^2$ . Ainsi, le modèle d'évolution de l'angle d'inclinaison se réécrit sous la forme d'une représentation d'état linéaire autour de  $(\varphi, \dot{\varphi}) = (0, 0)$ , en substituant l'expression de la vitesse de lacet  $\dot{\theta}$  par son expression en régime permanent linéarisé  $\dot{\theta} = v_2 \left( \frac{\delta + \beta_F - \beta_R}{L} \right)$  :

$$\begin{cases} \dot{X}^{TCL} &= A^{TCL} X + B^{TCL} w^{TCL} \\ Y^{TCL} &= C^{TCL} X^{TCL} \end{cases} \quad (2.76)$$

avec le vecteur d'état  $X^{TCL} = [\varphi \ \dot{\varphi} \ \sin \alpha]^T$ , la variable de commande  $w^{TCL} = v_2^2$  et les matrices :

$$A^{TCL} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{-k_r}{m h^2} & \frac{-b_r}{m h^2} & g \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B^{TCL} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\beta) \left( \frac{\delta + \beta_B - \beta_R}{h L} \right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C^{TCL} = [ 1 \ 0 \ 0 ]$$

A partir de ce modèle d'état, l'objectif est de déterminer la vitesse  $v_2$  risquant de mener le robot à une situation instable au bout d'un horizon de prédiction compatible avec l'évolution de la dynamique de roulis et le temps de réponse des actionneurs gérant la vitesse du robot. Comme dans le cas de la commande en angle de braquage, le principe de commande prédictive est utilisé, afin d'anticiper suffisamment pour laisser le temps aux actionneurs de réagir. Le modèle d'état (2.76) ne fait toutefois pas intervenir explicitement le  $TCL$ . Aussi la deuxième équation du système (2.75) est exploitée pour calculer une valeur limite de l'inclinaison ( $\varphi^{Lim}$ ) correspondant à une valeur maximale admissible pour le Transfert de charge  $TCL^{Lim}$  choisie arbitrairement comme assurant la stabilité physique du robot :

$$\varphi^{Lim} = \pm \arcsin \left( \frac{c}{2h} TCL^{Lim} \right) \quad (2.77)$$

La valeur  $\varphi^{Lim}$  calculée par (2.77), est alors considérée comme la valeur à atteindre par l'état  $Y^{TCL}$  sous l'effet de la commande  $w^{TCL}$ . Le principe de commande prédictive est alors repris pour calculer la valeur de  $w^{TCL}$  permettant d'atteindre au mieux  $\varphi^{Lim}$  au bout d'un horizon de prédiction comme schématisé sur la figure 2.49

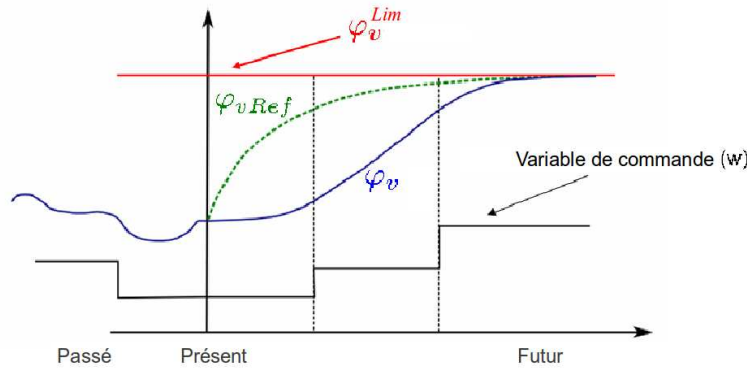


FIGURE 2.49 – Schéma de prédiction pour atteindre  $\varphi^{Lim}$

Le résultat de l'algorithme de prédiction (détaillé dans [BLTM10]) est la valeur notée  $w^{max}$  de  $w^{TCL}$  à appliquer à l'instant présent pour que la valeur de l'inclinaison de la masse suspendue  $\varphi$  atteigne la valeur cible  $\varphi^{Lim}$  au bout de l'horizon de prédiction (menant la valeur de  $TCL$  à la valeur critique  $TCL^{Lim}$ ). De fait,  $w^{max}$  est la commande maximale que l'on peut appliquer pour maintenir le robot dans un état stable  $|TCL| < TCL^{Lim}$ . En considérant que le robot évolue en marche avant, la valeur de la vitesse maximale admissible est déduite de  $w^{max}$  par l'expression :

$$v_2^{max} = \sqrt{w^{max}} \quad (2.78)$$

$v_2^{max}$  est donc la vitesse maximale admissible à l'instant présent pour conserver la stabilité dynamique du robot. Ainsi le minimum entre la vitesse désirée pour  $v_2$ , notée  $v_2^d$  et la vitesse maximale

$v_2^{max}$  (calculée par (2.78) et issue de l'algorithme de commande prédictive) doit donc être appliqué pour aller le plus vite possible en garantissant la stabilité. Le schéma de la figure 2.50 résume ainsi l'algorithme, qui est alimenté par l'observateur ObsDyn, afin de connaître les valeurs des dérivées et de leurs rigidités, nécessaire à la connaissance du modèle d'état (2.76).

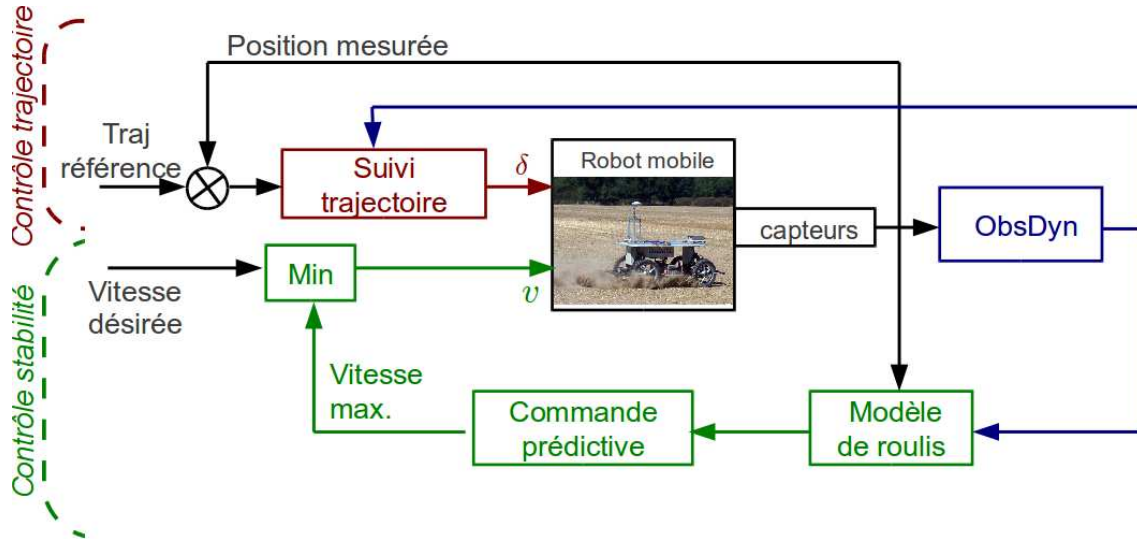


FIGURE 2.50 – Schéma global de commande pour le suivi de trajectoire en préservant la stabilité latérale

On note bien que l'algorithme de limitation intervient en parallèle de la gestion des déplacements et qu'à partir du moment où les dynamiques latérale et longitudinale sont découplées, la même commande pour l'asservissement de la position du robot est utilisée avec et sans limitation de la vitesse. Néanmoins, le même observateur ObsDyn, permet d'alimenter à la fois la loi de commande sur l'angle de braquage et la limitation de la vitesse, basées toutes deux sur des philosophies similaires.

### 2.4.1.2 Résultats

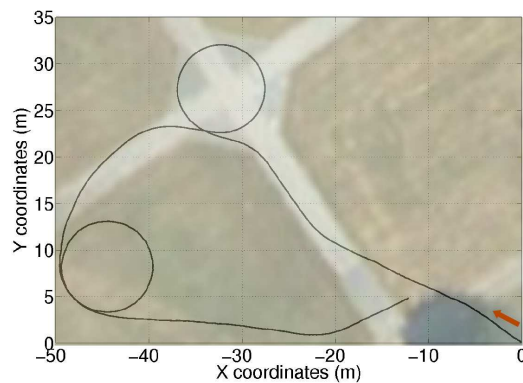


FIGURE 2.51 – Trajectoire de référence

L'application de la stratégie de commande illustrée par la figure 2.50 permet effectivement de limiter le transfert de charge en agissant sur la vitesse. En reprenant la trajectoire suivie dans la section 2.1 et rappelée sur la figure 2.51, un essai effectué avec une vitesse désirée  $v_2^d = 6m/s$  est proposé sur RobuFAST, suivi d'un essai dans les mêmes conditions en activant la limitation de



la vitesse. Durant le premier essai, la vitesse est constante et égale à 6m/s induisant un transfert de charge important, allant jusqu'à une valeur unitaire (les roues d'un même côté ne sont plus en contact avec le sol). L'évolution du TCL dans ce cas est reportée en trait plein noir sur la figure 2.52. On constate que durant le premier cercle sur bitume, la valeur atteinte converge autour de -0.85, tandis que durant le second virage sur herbe, les crampons s'enfoncent dans le sol, améliorant l'adhérence et renforçant le risque de renversement (la valeur du TCL atteint 1).

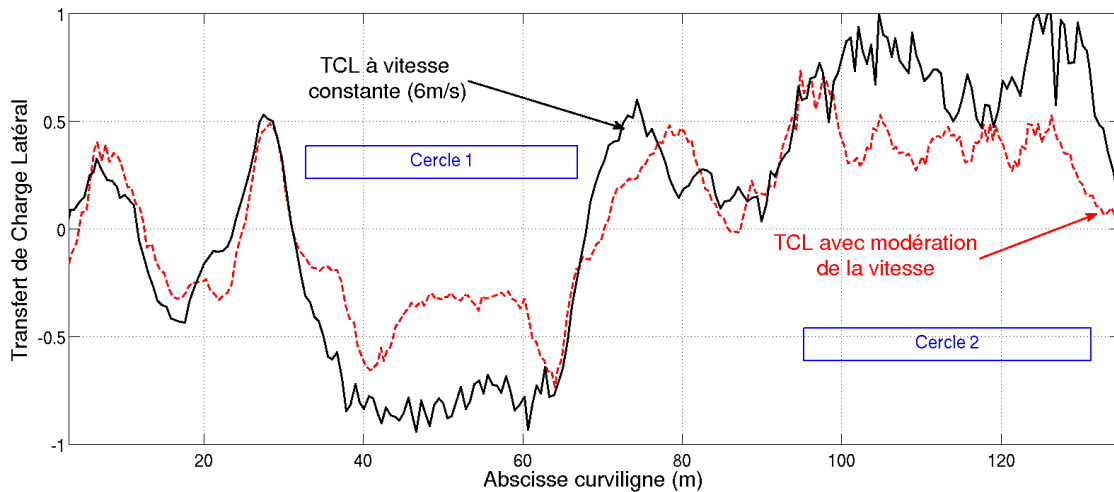


FIGURE 2.52 – Comparaison des  $TCL$  avec et sans algorithme de modulation

Pour le second essai la valeur limite du TCL a été fixée à 0.4 ( $TCL^{Lim} = 0.4$ ) afin de montrer clairement l'intérêt de la modulation de vitesse. Dans ce second cas, en agissant sur la vitesse, le TCL est bien limité à 0.4 durant les deux cercles et de façon indépendante des conditions d'adhérence (courbe en trait interrompu rouge). Des dépassements aux entrées et sorties de virage peuvent néanmoins être remarqués. Ceux-ci sont liés au temps de réponse des actionneurs d'une part, et au fait que le modèle d'état (2.76) a été construit en négligeant le régime transitoire. Ceci autorise le TCL à dépasser la valeur critique fixée manuellement lors des phases transitoires d'autre part. Cette limitation du risque de renversement est permise par l'intermédiaire de l'extraction de la vitesse menant au TCL critique et à son application à la place de  $v_2^d$  si cette dernière est supérieure à  $v_2^{max}$ .

Les vitesses mesurées durant les deux essais sont comparées sur la figure 2.53. Durant le premier essai, après l'initialisation, la vitesse d'avance du robot est bien constante et égale à 6m/s (sans tenir compte du risque de renversement). En revanche, durant le deuxième essai, l'activation de l'algorithme de modulation conduit à appliquer le minimum entre  $v_2^{max}$  et  $v_2^d$ . Cette valeur est représentée en trait plein rouge sur la figure, tandis que la vitesse réellement mesurée durant cet essai est reportée en trait interrompu noir. On note bien que durant les deux cercles, la vitesse appliquée au robot est abaissée pour permettre la limitation du transfert de charge. Durant le premier cercle, cette valeur décroît à 3m/s et remonte progressivement jusqu'à 5m/s, alors que le  $TCL$  est constant. Ceci montre que le calcul de la vitesse maximale s'adapte au contexte, et en particulier aux conditions d'adhérence. Ainsi, durant le second cercle, cette vitesse demeure constante et égale à 4m/s, compte tenu de la meilleure adhérence sur l'herbe.

Ce résultat, corroboré par d'autres essais montre la capacité d'ajouter, de façon indépendante de la commande sur les déplacements, un contrôle de la vitesse pour préserver la stabilité dyna-

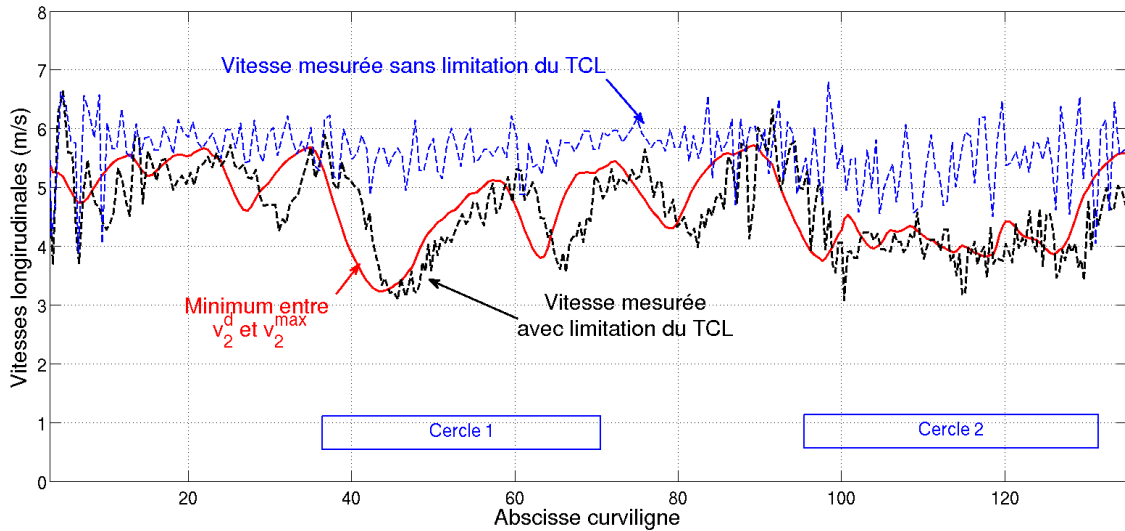


FIGURE 2.53 – Comparaison des vitesses avec et sans algorithme de modération

mique du robot. Une première vision de l'intégrité est ainsi prise en compte.

### 2.4.2 Extension à la notion de traversabilité

L'algorithme de modération de la vitesse décrit précédemment, dépend des conditions d'adhérence estimées par ObsDyn, de l'état du robot, et de l'inclinaison de la masse non suspendue (homogène à l'inclinaison du sol) à l'instant  $t$ . On note alors que la connaissance de l'inclinaison future du sol permet d'anticiper plus encore le risque de renversement. Au-delà de cette anticipation, l'équation d'évolution du transfert de charge ((2.75) dans sa version simplifiée) peut amener à construire un profil de vitesse sur une portion de trajectoire en considérant constantes les conditions d'adhérence et connaissant l'inclinaison  $\alpha$  future. La connaissance de cette inclinaison peut être réalisée par l'ajout de capteurs extéroceptifs (stéréovision, nappe laser, etc...) qui autorisent une reconstruction tri-dimensionnelle du profil de sol autour du robot.

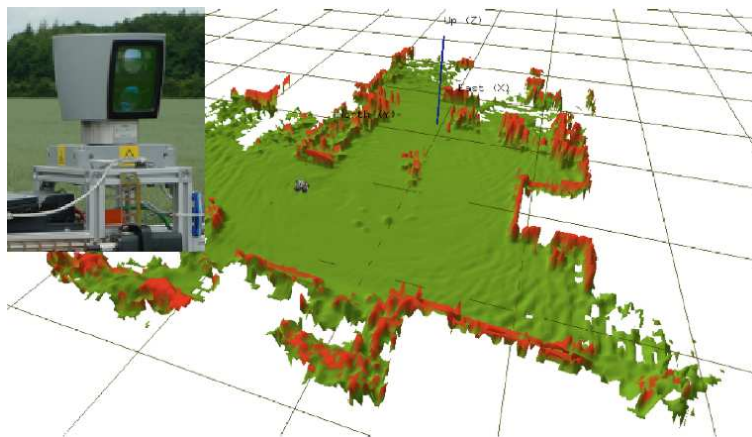


FIGURE 2.54 – Exemple d'un Modèle Numérique de Terrain construit avec un VeloDyne - LAAS

Le développement d'algorithmes permettant une telle construction, appelé Modèle Numérique de Terrain (MNT) et illustré par la figure 2.54, fait l'objet de nombreux développements en utilisant différents capteurs : par exemple LiDAR pour [Sus10], Stéréovision dans [LJM02], ou couplage camera et laser dans [MDCD10]. Entre autres utilités, un maillage du sol peut être extrait

d'un MNT, sur lequel un posé de robot en un point donne l'inclinaison du robot. Dans [DDL10], l'exploitation d'une grille d'élévation (construite par fusion d'informations entre caméra et laser) est ainsi exploitée afin d'obtenir les angles de roulis et tangage d'un robot. En appliquant la même simplification réalisée pour obtenir (2.75) au cas du tangage, un profil de vitesse est calculé sur une trajectoire probable du robot.

Ce profil, illustré en 3D sur la figure 2.55, donne alors la vitesse maximale admissible sur une trajectoire (en calculant le minimum entre vitesse maximale admissible pour la stabilité latérale et longitudinale), autorisant à traverser une zone de façon sûre. La traversabilité d'un terrain est alors ainsi évaluée, en calculant, à partir du profil de sol, la vitesse à laquelle la zone peut être franchie. Si ce profil passe par une vitesse nulle, alors la trajectoire passe par une zone non traversable (ou infranchissable), traduisant ainsi la présence d'un obstacle.

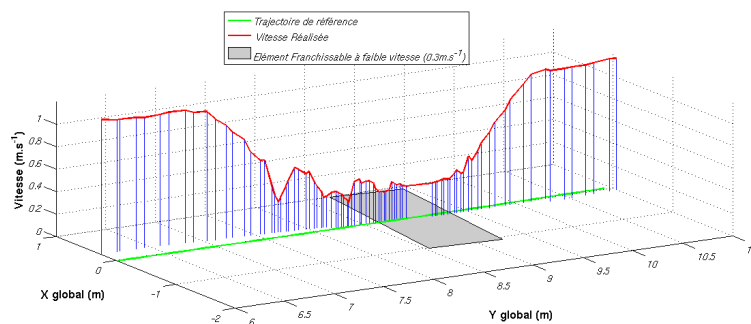


FIGURE 2.55 – Exemple de calcul du profil de vitesse relativement à une trajectoire

La notion d'obstacle apparaît ainsi comme un cas particulier de la traversabilité. Il s'agit d'une zone traversable à vitesse nulle. Pour s'affranchir de ce cas particulier, et suivre une trajectoire le plus rapidement possible, la notion d'évitement de zone non traversable ou traversable à faible vitesse est alors abordée et détaillée dans [Del10]. Cette stratégie consiste à considérer un couloir autour d'une trajectoire désirée dans lequel le robot est autorisé à évoluer. Ce couloir est défini comme un écart latéral admissible en positif et négatif autour de la trajectoire. A chaque instant, un nombre fini  $N$  d'écarts à la trajectoire est généré à une distance  $d$  du robot correspondant à la distance parcourue durant le temps de réponse du robot à un échelon d'écart latéral désiré  $y^d$ . Une trajectoire définie en variation d'écart à la trajectoire de référence peut alors être spécifiée, menant alors à chaque instant à la définition d'un nombre  $N$  de trajectoires d'évitement.

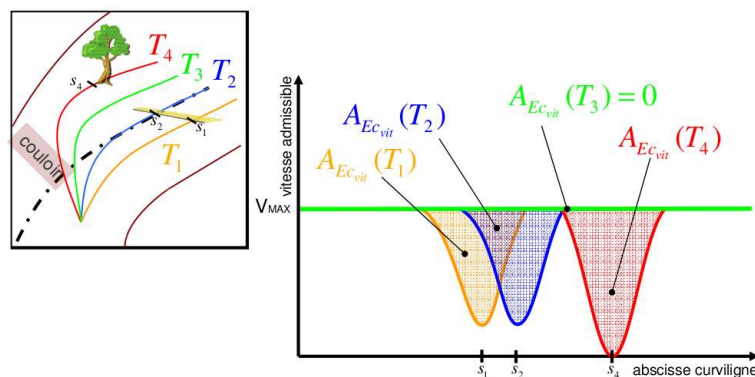


FIGURE 2.56 – Génération de trajectoires d'évitement et de profils de vitesse correspondants

Ceci est illustré sur la figure 2.56 avec  $N = 4$  et par conséquent 4 trajectoires correspondantes :  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  et  $T_4$ . Par l'intermédiaire du MNT et de la détermination de la vitesse maximale admissible, un profil de vitesse est calculé pour chacune des trajectoires  $T_i$ , comme représenté sur la partie droite de la figure 2.56. Si le passage du profil de vitesse par zéro sur une trajectoire élimine celle-ci d'emblée, le choix entre les trajectoires doit être réalisé. Un algorithme de minimisation de fonction de coût intégrant notamment l'écart à la vitesse désirée et l'écart à la trajectoire de référence permet la sélection de la trajectoire assurant un "meilleur" compromis entre réduction de vitesse et modification de trajectoire.

Compte-tenu du fait que les trajectoires d'évitement  $T_i$  sont définies en terme d'écart latéral  $y$  à la trajectoire de référence en fonction de l'abscisse curviligne, les mêmes lois de commande que précédemment sont utilisées. Il suffit de considérer la consigne d'écart  $y^d$  comme égale à celle donnée par la définition de la trajectoire sélectionnée (ainsi que de sa dérivée), et le suivi de profil de vitesse de la même manière que pour l'asservissement en vitesse (2.72). Il devient alors possible de gérer la traversabilité et donc les obstacles sans modifier la commande, ni les algorithmes d'observation. Seules les consignes de vitesse et d'écart latéral désiré sont modifiées par l'intermédiaire de l'algorithme précédent. Cette stratégie permet donc au robot d'évoluer le plus vite possible et de façon stable autour d'une trajectoire préférentiellement suivie.

### 2.4.3 Admissibilité des commandes générées

Si la gestion de la stabilité permet l'évolution la plus rapide possible d'un robot en garantissant sa stabilité, la vitesse maximale calculée ne tient pas compte de la saturation de l'angle de braquage. En conséquence, si cet angle est saturé, le suivi précis ne peut être assuré, et le risque de perte de contrôle (souvent associé à une saturation de l'actionneur) est possible. Afin de rendre la commande envoyée sur l'angle de braquage compatible avec la limitation des actionneurs, la même philosophie que pour la gestion de stabilité est adoptée. Il s'agit là encore de calculer la vitesse menant à un angle de braquage maximal admissible noté  $\delta_{max}$ .

#### 2.4.3.1 Extraction de la vitesse maximale admissible

Afin de pouvoir calculer la vitesse maximale pour satisfaire la condition  $|\delta^F| < \delta_{max}$ , une relation entre la vitesse longitudinale  $v_2$  et l'angle de braquage avant  $\delta_F$  est calculée. Celle-ci est reprise du modèle dynamique dans le plan de lacet (2.17). En considérant que dans ces développements l'angle de braquage arrière est nul ( $\delta_R = 0$ ) et que l'inclinaison du sol est négligeable, alors le modèle dynamique linéarisé peut s'écrire sous la forme d'état (2.79)

$$\dot{X}^\delta = A^\delta X^\delta + B^\delta \delta \quad (2.79)$$

avec

$$A^\delta = \begin{pmatrix} -\frac{C_F + C_R}{m v_2} & -\frac{m v_2^2 + C_F L_F - C_R L_R}{m v_2^2} \\ -\frac{C_F L_F - C_R L_R}{I_z} & -\frac{C_F L_F^2 + C_R L_R^2}{I_z v_2} \end{pmatrix}$$

$$B^\delta = \begin{pmatrix} \frac{C_F}{m v_2} & \frac{C_F L_F}{I_z} \end{pmatrix}^T$$

et le vecteur d'état

$$X^\delta = (\beta \quad \dot{\theta})^T$$

En considérant l'équilibre statique  $\dot{X}^\delta = 0$ , le système (2.79), et en utilisant le calcul détaillé dans [HLTM11], la relation 2.80 est établie.

$$v_2(s) = \sqrt{\left( \frac{C_F C_R L (L c(a) - \delta)}{c(s) m (C_F L_F - C_R L_R)} \right)} \quad (2.80)$$

Cette expression suppose que la trajectoire est suffisamment bien suivie pour que la courbure de la trajectoire soit égale à l'inverse du rayon de braquage du robot soit  $c(s) = \frac{\dot{\theta}}{v_2}$ . Moyennant cette hypothèse, cette relation peut être extrapolée pour toute abscisse curviligne  $s$  de la trajectoire de référence dans un voisinage proche de l'abscisse curviligne du robot, et en considérant que l'adaptation de  $C_F$  et  $C_R$  est valide dans ce voisinage. En occultant les conditions d'existence de (2.79), adressées en pratique dans [HLTM11], un profil de vitesse admissible  $v_2^{max2}(s)$  pour assurer la condition  $|\delta^F| < \delta_{max}$  est calculé sur un horizon de prédiction  $h$  devant le robot. Ce profil peut alors être comparé au profil de vitesse calculé précédemment pour la stabilité ainsi qu'à la vitesse désirée pour extraire le minimum entre  $v_2^d$ ,  $v_2^{max}$  et  $v_2^{max2}$ . Le suivi en vitesse du profil ainsi défini, calculé avec un horizon suffisamment grand, est alors assuré par l'intermédiaire de la commande prédictive sur la vitesse longitudinale donnée par (2.72).

### 2.4.3.2 Résultats

Afin de tester cet algorithme de limitation de l'angle de braquage par l'intermédiaire de la modération de la vitesse d'avance du robot, la trajectoire de référence décrite sur la figure 2.57(a) est définie durant un apprentissage manuel. Cette trajectoire est composée de deux cercles successifs, dont la courbure est tracée sur la figure 2.57(b). Le premier cercle est exécuté sur asphalt

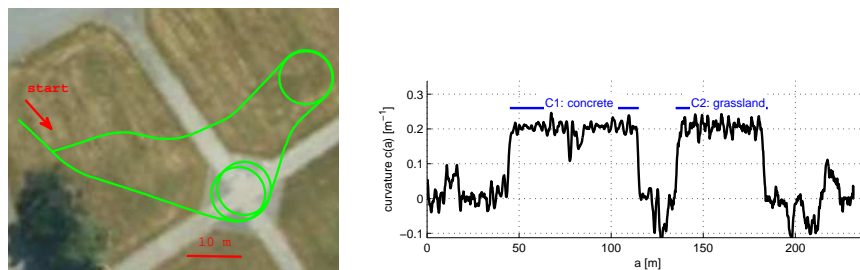


FIGURE 2.57 – Trajectoire de référence et courbure correspondante

et le second sur herbe humide. Contrairement aux cas précédents, l'humidité plus importante crée ici une adhérence plus faible sur l'herbe que sur l'asphalte. En conséquence, comme le robot est sous-vireur dans ces conditions, l'angle de braquage requis pour suivre la trajectoire sur l'herbe sera plus important. Cette trajectoire est suivie avec RobuFAST avec une vitesse désirée de  $4\text{m/s}$  ( $v_2^d = 4\text{m/s}$ ). Deux suivis sont effectués successivement. Dans le premier cas, l'algorithme de limitation de vitesse est désactivé, autorisant l'angle de braquage à atteindre toute valeur tandis que dans le second, on impose un angle maximal de  $17^\circ$  ( $\delta_{max} = 17^\circ$ ) en activant la limitation de vitesse décrite précédemment.

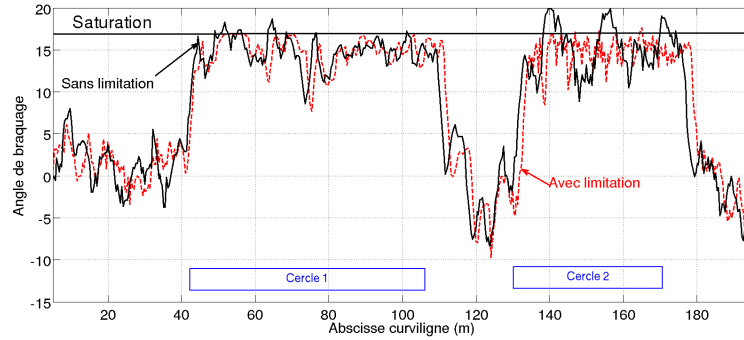


FIGURE 2.58 – Comparaison entre les angles de braquage avec et sans limitation de la vitesse

Les angles de braquage  $\delta_F$  enregistrés durant les deux suivis sont comparés sur la figure 2.58. Le résultat obtenu sans limitation (en trait plein noir) montre que l'angle requis pour suivre la trajectoire durant le second cercle atteint effectivement des valeurs plus importantes et supérieures à la limite imposée dans le second cas de  $17^\circ$ . En revanche, lors du premier cercle, cet angle est proche de  $17^\circ$ . Lors du deuxième suivi, avec la modération de la vitesse (courbe en trait interrompu rouge), l'angle de braquage demeure inchangé pour le suivi du premier cercle et demeure proche de  $17^\circ$ . Cependant, lors du suivi du deuxième cercle, qui impose de dépasser  $\delta_{max}$ , la modération de la vitesse permet à l'angle de braquage de rester en dessous de la limite, en particulier à l'entrée du cercle (i.e. à l'abscisse curviligne 140m).

Ce résultat a été obtenu en agissant sur la vitesse, i.e. en calculant la vitesse  $v_2^{max2}$  conduisant à l'angle  $\delta_{max}$ , et en appliquant le minimum entre  $v_2^{max2}$  et  $v_2^d$ . Sur la figure 2.59 les vitesses obtenues durant le premier essai (sans limitation, en trait plein noir) et durant le second essai (avec limitation, en trait interrompu rouge) sont comparées. Durant le premier cercle, les deux vitesses sont superposées, puisque l'angle sans limitation ne dépasse pas  $\delta_{max}$ . A contrario, lors du second cercle, la vitesse imposée durant le deuxième essai décroît jusqu'à 2m/s afin d'éviter le dépassement lié à l'entrée du second cercle (abscisse curviligne 140m), permettant à l'angle de braquage de frôler la limite imposée. A mesure que le robot suit la trajectoire les rigidités de dérive convergent, autorisant le robot à accélérer sans dépassement de l'angle limite, afin d'achever le cercle à la vitesse désirée de 4m/s.

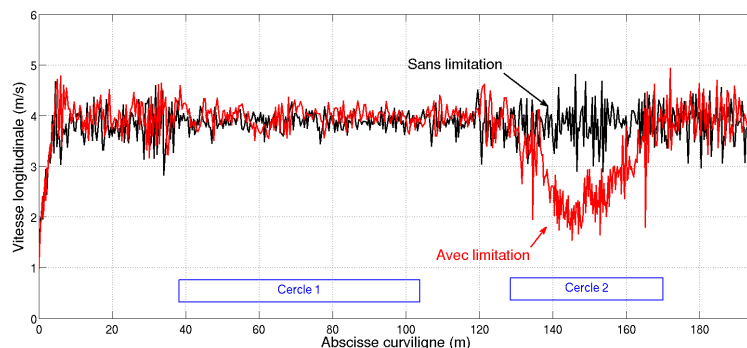


FIGURE 2.59 – Comparaison entre les vitesses mesurées avec et sans limitation de la vitesse

Cette variation de vitesse ne perturbe pas la précision de suivi. La loi de commande, construite sur le découplage des dynamiques longitudinale et latérale est ainsi valide. En effet, sur la figure 2.60, les erreurs de suivi lors des deux essais sont comparées. Elles montrent un compor-

tement similaire avec des valeurs maximales relativement faibles hormis à l'abord du second cercle. Dans le cas de la commande sans limitation, le robot aborde le second virage rapidement, avec des conditions d'adhérence très faibles. Ceci amène à une situation proche du tête à queue, générant le comportement oscillant observé.

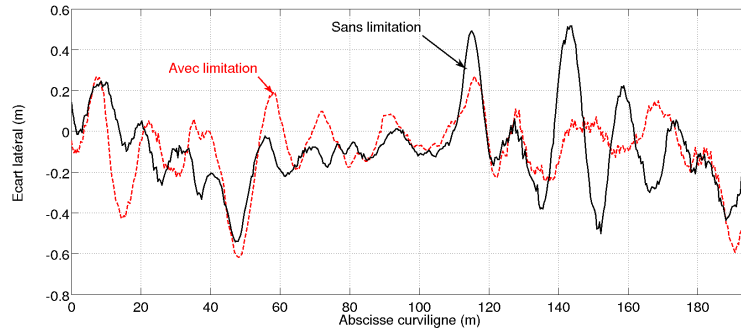


FIGURE 2.60 – Comparaison entre les écarts latéraux mesurés avec et sans limitation de la vitesse

Lors du second essai, le robot ralentit à l'abord du deuxième cercle, lui permettant d'améliorer son adhérence et d'être plus loin du risque de perte de contrôle. Ainsi, l'asservissement est amélioré et l'accélération douce permet de poursuivre précisément la trajectoire. Ce résultat, plus détaillé dans [HLTM11], montre la capacité à respecter les limitations physiques des actionneurs. La limitation de la vitesse permet naturellement d'améliorer l'adhérence, et limite par conséquent le risque de perte de contrôle mais ne prend pas explicitement ce risque en compte.

#### 2.4.4 De la modération de la vitesse

Les développements présentés dans cette section, montrent la capacité à préserver l'intégrité du robot et du suivi de trajectoire en n'intervenant pas directement sur la loi de commande de suivi de trajectoire (gérant principalement les angles de braquage), mais sur la seconde variable de commande ou sur la consigne d'écart désiré. Ce résultat est rendu possible grâce à l'indépendance vis-à-vis de la vitesse, obtenue par construction de la loi de commande. Cette indépendance est toutefois relative, puisque la modification de vitesse modifie les conditions d'adhérence et donc les dérives et leurs rigidités estimées soit par ObsCin soit par ObsDyn. La réactivité de l'algorithme d'observation autorise toutefois à avoir un comportement précis malgré ces variations. Par ailleurs c'est par l'intermédiaire de ce couplage qu'il est possible d'éviter la saturation de l'angle de braquage.

La philosophie adoptée ici pour agir sur la vitesse par l'intermédiaire du modèle dynamique (adapté en ligne par l'observation) est appliquée à la stabilité dynamique (étendue à la notion de traversabilité) et le respect des saturations sur les actionneurs. On entrevoit toutefois, que l'exploitation du modèle dynamique peut être accrue en vue de préserver d'autres aspects : respect de la saturation en vitesse de l'angle de braquage, écart maximal à la trajectoire, limitations des rigidités de dérive, etc... On entrevoit ainsi d'autres possibilités qui pourraient intervenir comme des limitations supplémentaires de la vitesse ou éventuellement d'autres variables potentielles de commande.



## 2.5 Synthèse de la stratégie globale de commande

Cette section propose une synthèse des développements réalisés et présentés dans les sections précédentes. Ces travaux sont ici appliqués au cas de la gestion des déplacements de robots mobiles en milieux naturels et potentiellement à haute vitesse. La thématique générale du suivi de trajectoire est abordée, mais, comme il a été mis en évidence, les principes proposés, notamment pour ce qui concerne la haute vitesse et le maintien d'intégrité, dépassent ce cadre strict.

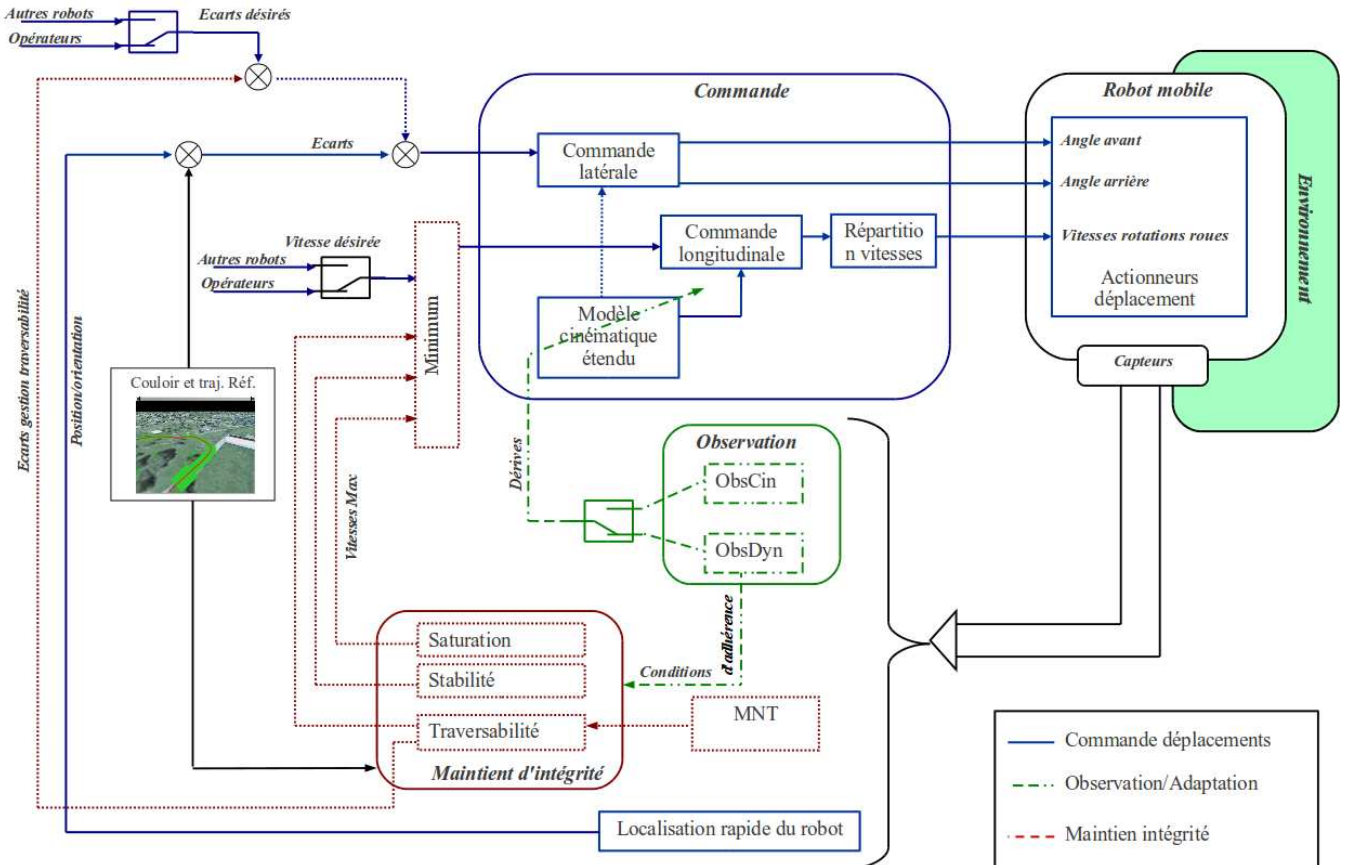


FIGURE 2.61 – Schéma global de la commande proposée

Le schéma de la figure 2.61 reprend de façon synthétique les différentes avancées présentées de manière itérative dans les sections précédentes en les intégrant dans un schéma global de commande, permettant de gérer de façon précise, stable et autonome, l'évolution d'un robot mobile en milieu naturel. Cette stratégie autorise la prise en compte de fortes dynamiques, de nature variable et incertaine, afin de préserver les performances des déplacements (du point de vue de la précision et de l'intégrité) et ce, dans le cadre de plusieurs applications : suivi à basse et haute vitesse, coopération, poursuite de vitesse, demi-tour, etc... Quelle que soit l'application, la stratégie de commande globale demeure adaptée, et seuls quelques ajustements sont requis, sans impacter la philosophie générale des travaux. Ce schéma global de commande s'articule autour des parties suivantes.

### 2.5.1 Partie commande des déplacements

Cette partie, centrée sur la commande pure est décrite en trait plein bleu sur le schéma de la figure 2.61. Celle-ci est fondée sur l'hypothèse d'indépendance entre les dynamiques latérale



et longitudinale et construite pour préserver cette hypothèse. Néanmoins le couplage existant physiquement entre ces deux dynamiques est réalisé de façon implicite par l'intermédiaire de l'observation qui adapte les variables de commande. La modulation de la vitesse modifie en effet le comportement latéral, mais cette modification influe sur les variables observées qui sont alors intégrées de façon transparente sur la commande latérale. De façon plus précise, ces deux types de commande sont construits de la manière suivante.

### 2.5.1.1 Commande latérale

L'objectif de la commande latérale est d'assurer la convergence des écarts latéral  $y$  et angulaire  $\tilde{\theta}$  vers les consignes émanant de plusieurs sources : choisies par l'opérateur, dépendant de la position d'autres robots (coopération), ou provenant de la gestion de la traversabilité. Quelles que soient ces consignes (et leurs variations), cette commande assure la convergence des écarts réels vers les écarts désirés, en agissant sur les angles de braquage avant  $\delta_F$  et arrière  $\delta_R$ .

Afin de préserver la précision en intégrant les phénomènes perturbants et non négligeables en milieu naturel, la commande est basée sur un modèle cinématique étendu (détaillé dans la section 2.1.3.2), qui permet de les caractériser par l'intermédiaire des angles de dérive. Ceux-ci sont estimés en ligne par observation (voir ci-après), et réinjectés dans le modèle utilisé pour la synthèse de la commande. Ceci lui confère un caractère adaptatif, à même de conserver la précision vis-à-vis des conditions d'adhérence (voir section 2.3.2.1).

Afin de prendre en compte le caractère dynamique, d'autant moins négligeable que le robot évolue rapidement, cette commande est dotée d'un caractère prédictif. Celui-ci est basé sur la connaissance de la trajectoire de référence et des propriétés des actionneurs et du robot. Comme détaillé dans la section 2.3.2.1, une commande prédictive à modèle est substituée à la partie de la commande gérant l'asservissement de courbure, afin d'anticiper les variations de trajectoire et compenser ainsi les retards liés aux transitoires.

Comme détaillé dans la section 2.3.2.2, l'interaction entre l'asservissement latéral et angulaire et donc  $\delta_F$  et  $\delta_R$  est adressée par une technique de backstepping (ou commande en cascade). La commande du train avant permet la convergence de l'écart latéral  $y$  pour toute valeur de l'angle arrière. L'expression obtenue est ensuite réinjectée dans le modèle cinématique étendu, conduisant à un modèle de dynamique angulaire ne dépendant que de  $\delta_R$  comme variable de commande, dont une loi de commande peut alors être déduite.

### 2.5.1.2 Commande longitudinale

La commande longitudinale a pour objectif d'asservir la vitesse  $v$  du robot afin de suivre une consigne (potentiellement variable) émanant du bloc "Minimum" fusionnant, les consignes émanant soit d'un opérateur (vitesse désirée  $v^d$ ), soit d'autres robots (pour maintenir une formation), soit des consignes calculées pour le maintien d'intégrité. Elle est basée sur les mêmes principes que la commande latérale. D'une part, elle repose sur le modèle cinématique étendu, adapté en temps réel. D'autre part, lorsqu'un profil de vitesse est défini (notamment en ce qui concerne le demi-tour et la traversabilité), la commande prédictive détaillée dans la section 2.3.3.1, est appliquée afin d'anticiper sur le temps de réponse des actionneurs.

La vitesse globale d'avance du robot, ainsi générée, est ensuite décomposée sur les quatre roues du robot. Cette répartition est générée a priori par le modèle cinématique. Néanmoins dans le cadre des développements [LLG<sup>+</sup>10] réalisés en collaboration, cette répartition peut être mo-

difiée pour améliorer le comportement latéral. Cette modification agit sur la vitesse de lacet, et la modification du comportement latéral induit est naturellement prise en compte par l'observation.

## 2.5.2 Partie observation

Cette partie de l'algorithme est représentée en trait mixte vert sur le schéma d'intégration de la figure 2.61. Elle est très importante puisque celle-ci réalise l'adaptation en temps réel des variables utilisées dans les autres parties, afin de préserver la pertinence des modèles utilisées, quelles que soient les modifications d'interaction du robot avec son environnement. La section 2.2 détaille les observateurs mis en œuvre, qui exploitent soit le modèle cinématique étendu seul, soit une complémentarité entre les représentations cinématique étendu et dynamique. Deux types de données sont mises à jour en temps réel par l'intermédiaire de l'observation :

- Les angles de dérive  $\beta_F$  et  $\beta_R$  qui sont principalement utilisées pour la synthèse de la commande des déplacements par l'intermédiaire du modèle cinématique étendu.
- Les conditions d'adhérence (i.e. les rigidités de dérive  $C_F$  et  $C_R$ ) qui permettent d'alimenter les représentations dynamiques décrites dans la section 2.1.4. Ces modèles dynamiques permettent alors une estimation plus réactive des dérivées, mais sont également nécessaires au calcul des commandes pour le maintien d'intégrité.

Les deux observateurs ObsCin et ObsDyn sont basés sur des systèmes de représentation différents et la sélection de l'un ou l'autre dépend des usages. Le maintien d'intégrité nécessite l'usage de modèle dynamique et requiert donc l'emploi de ObsDyn. Néanmoins l'estimation des dérivées requise pour la commande des déplacements peut se faire avec les deux méthodes. Comme il a été souligné dans la section 2.3.3.3, l'évolution à haute vitesse nécessite une estimation très réactive pour conserver une bonne précision, privilégiant ainsi ObsDyn. Mais à basse vitesse, ce dernier génère beaucoup de bruits compte tenu de la faible excitation du modèle dynamique, faisant que l'estimation par ObsCin est plus pertinente à vitesse modérée. Le choix est alors à opérer en fonction de la vitesse d'avance, ce qui peut toutefois générer des effets de commutation.

## 2.5.3 Partie maintien d'intégrité

La contribution de cette partie est représentée en trait pointillé rouge sur la figure 2.61, et doit assurer l'intégrité physique du robot (principalement mise à mal à haute vitesse). Dans ces travaux, la notion d'intégrité se décline en maintien de la stabilité physique, de la traversabilité et du respect des saturations des actionneurs (voir le détail en section 2.4). La philosophie retenue et commune à ces trois aspects n'est toutefois pas restrictive à ces cas.

Afin préserver la stratégie de commande des déplacements établie à la section 2.3, tant au niveau latéral que longitudinal, le maintien d'intégrité n'intervient pas directement au sein des lois de commande, mais vient modifier les consignes d'écart et de vitesse issues soit de l'opérateur soit des processus de gestion de formation, détaillés en section 2.3.3.2. En ce qui concerne la stabilité et le respect des saturations, seule la consigne de vitesse est impactée. En revanche, la gestion de traversabilité intervient sur les deux consignes, afin de préserver la stabilité et d'éviter des zones faiblement traversables (i.e. traversables à basse vitesse) ou infranchissables (i.e. traversables à vitesse nulle), selon l'algorithme présenté en section 2.4.2.

Toutefois, elles exploitent les mêmes représentations cinématique étendu et dynamique, construites en section 2.1 et mises à jour en temps réel par l'observation (voir section 2.2). En outre, elles

---

sont basées sur les mêmes principes de commande prédictive que ceux exploités pour la commande des déplacements. Plus précisément, elles tirent parti des modèles dynamiques adaptés pour déduire les vitesses maximales admissibles pour conserver les métriques représentatives de l'intégrité du robot dans un domaine d'évolution prédéterminé ( $\delta_{max}$ ,  $TCL^{Lim}$ ). Les consignes permettant l'évolution à la vitesse la plus rapide possible sont alors calculées pour moduler les consignes nominales.



# Chapitre 3

## De l'adaptation à la reconfiguration

### 3.1 Problématique

Les avancées réalisées dans le cadre de ces travaux de recherche montrent que les approches adaptatives et prédictives permettent d'aborder de façon pertinente le contrôle de processus dont la dynamique est variable et incertaine. Le schéma de commande global présenté sur la figure 2.61 permet ainsi d'aborder l'asservissement des déplacements dans plusieurs cas d'application de façon générique. Toutefois, l'alimentation des lois de commande, que ce soit par l'estimation des variables (observation) ou par la modification des consignes (coopération, maintien d'intégrité) est réalisée ou est réalisable par plusieurs algorithmes. En effet, pour l'estimation des dérivées d'une part, deux algorithmes d'observation sont développés qui présentent des performances différentes et qu'il convient d'intervertir en fonction de la vitesse. D'autre part, le maintien d'intégrité fait intervenir plusieurs profils de vitesse, entrant en concurrence, et dont la sélection est réalisée à ce jour par la considération du profil présentant la vitesse la plus faible. De plus, comme il est mis en évidence dans la section 3.2, les travaux réalisés sur le maintien d'intégrité ne traitent pas l'exhaustivité des risques et d'autres possibilités de modération peuvent être ajoutées, amenant ainsi un nombre plus important de modifications possibles de consignes. Enfin, en section 2.3.3.3, il a été mis en évidence que pour être performante à haute vitesse, la loi de commande exigeait des modifications de ses paramètres (horizon de prédiction ou modèle adaptatif de bas niveau).

Il apparait alors que pour être pleinement performante, la stratégie de commande proposée doit être modifiée en fonction du contexte, de la perception de l'interaction robot/environnement et de l'application désirée pour le robot. Si une modification en ligne de ces paramètres peut être envisagée, il convient de vérifier qu'une telle modification n'entraîne pas une perte de stabilité ou un comportement oscillant lié aux phénomènes transitoires. Le comportement adaptatif présent dans l'approche proposée doit donc être prolongé pour permettre une bonne corrélation entre le contexte d'évolution (tâche à réaliser et état du robot) et la configuration de la stratégie de commande. Afin de préserver les performances dans l'ensemble des situations rencontrées, il convient alors de procéder à une reconfiguration de la commande.

Néanmoins, aussi performantes que soient les lois de commande, celles-ci se heurtent naturellement aux capacités physiques du robot. Si les limitations mécaniques sont prises en compte - ici par l'intermédiaire de la notion d'intégrité - l'inadaptation du robot par rapport à la tâche demandée peut entraîner l'échec de sa réalisation. Par exemple, en reprenant la notion de traver-

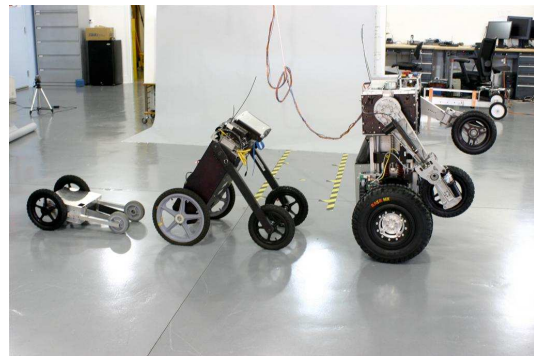
sabilité, une zone non traversable pour RobuFAST (comme un trottoir assez haut), le sera pour le tracteur, ou encore le serait pour RobuFAST si sa garde au sol était plus importante. De la même manière qu'on envisage une reconfiguration des lois de commande, une reconfiguration du robot peut être mise en œuvre, pour modifier son comportement ou ses propriétés mécaniques en fonction du contexte, afin de rendre le système commandable (i.e pouvoir asservir le robot sur ces consignes en préservant son intégrité).

La dépendance importante entre les propriétés mécaniques d'un système et la configuration des lois de commande est ainsi entrevue. En effet, la conception d'un robot (ses paramètres, le choix des actionneurs, les mobilités...) et les commandes qui lui sont applicables sont intimement liées. Ce fait paraît évident, en particulier au niveau des véhicules, puisqu'on utilise différents types de véhicule en fonction des besoins. Néanmoins, la notion de maintien d'intégrité au sein de la commande, comme présentée dans ces travaux de recherche, montre qu'il est possible de trouver un jeu de commande menant le système mécanique à ses limites. Ceci ne se fait pas que de façon figée, mais également en temps réel, puisque ces limites dépendent de l'interaction avec l'environnement qui est ici fortement variable. Au delà de la modération des actions de commande, on peut alors se servir du maintien d'intégrité pour extraire les faiblesses mécaniques du robot, soit en vue d'une reconception, soit en vue de piloter des mécanismes de reconfiguration du robot (comme des suspensions actives pour reprendre l'exemple du franchissement d'un haut trottoir et de RobuFAST).

Pour être pleinement opérationnelle, l'utilisation de la robotique, dans des situations présentant des dynamiques fortes et incertaines, requiert ainsi non seulement une adaptation en ligne de la commande, mais également une reconfiguration à la fois au niveau de la commande et du mécanisme. Ceci permet d'offrir une modularité importante, à même de faire face à la diversité de situations rencontrées. Plusieurs robots capables de reconfiguration mécanique ont d'ores et déjà été développés (voir deux exemples sur la figure 3.1). Cependant, le lien avec la commande est souvent établi a posteriori, faisant du pilotage de ces mobilités une tâche additionnelle indépendante du reste de la commande. De plus, la reconfiguration est souvent appréhendée en terme de modes de locomotions/déplacements (voir [PBF<sup>+</sup>05] et [Pey06]), qui sont cloisonnés et requièrent des lois de commande totalement différentes. Il s'agit alors de sélectionner hors ligne le mode le plus adapté parmi plusieurs, comme un choix entre plusieurs robots, sans modulations possibles, et avec des commandes structurellement différentes.



(a) Hylos II - ISIR - Paris



(b) TBot - IHMC - Floride, US

FIGURE 3.1 – Exemples de robots mobiles reconfigurables

La prise en compte du lien entre conception et commande et le développement de schémas de commande permettant d'adresser les variations de configuration reste ainsi à développer. Les recherches sur cette thématique doivent donc être explorées plus avant, notamment d'un point de vue mécatronique (i.e. en privilégiant la relation entre conception ou configuration mécanique et une structure modifiable de commande). Cette voie de recherche est ainsi privilégiée dans ce chapitre qui aborde la notion de reconfiguration mécatronique. Pour ce faire, le concept de maintien d'intégrité, abordé dans le chapitre précédent, sera tout d'abord généralisé, afin de mettre en évidence la nécessité de gérer l'interaction entre plusieurs commandes et l'intérêt d'introduire des mobilités additionnelles. L'intérêt d'un mécanisme de reconfiguration sera ainsi mis en évidence. Les différentes déclinaisons de cette notion seront alors abordées sur le plan de la commande et de la conception. L'interaction entre ces deux volets sera alors abordée, et quelques voies de développement capables d'appréhender cette interdépendance seront mises en avant, notamment au travers de l'exemple des robots mobiles. Enfin, la généralisation à d'autres champs d'application sera envisagée.

## 3.2 Généralisation de la notion d'intégrité

Dans la section 2.4 du chapitre précédent, l'intégrité du robot a été déclinée autour de trois thèmes : la stabilité, la traversabilité et le respect des saturations des actionneurs. Cette articulation est par nature incomplète, et il semble difficile de pouvoir traiter l'ensemble des risques par un recensement exhaustif des situations à risque, pour tous les robots, et dans toutes les conditions. Toutefois, la stratégie mise en œuvre peut être directement généralisée à d'autres types de risque en suivant la même philosophie, ce qui constitue des perspectives à court terme des travaux de recherche présentés :

- Gestion du risque de tête-à-queue. Durant les travaux traitant de la commande à haute vitesse, ce phénomène a été fréquemment rencontré. Si les développements sur la saturation des actionneurs (section 2.4.3) ont permis de réduire indirectement ce risque, celui-ci n'est pas explicitement adressé. Pour aller plus loin, il est nécessaire de prendre en compte les valeurs des rigidités de dérive estimées en temps réel par ObsDyn. En effet, l'expérience montre qu'une situation de perte de contrôle est généralement précédée d'un effondrement des rigidités. Pour limiter la vitesse vis-à-vis de la dérive, il semble possible de reprendre l'expression simplifiée (2.80) pour anticiper une baisse significative de  $C_F$  et de  $C_R$  et limiter la vitesse en conséquence.
- Garantie de commandabilité. Le point précédent peut être adressé en traitant le cas plus général de la perte de contrôlabilité. Au regard du modèle cinématique étendu, et en particulier du système chaîné (2.6), les conditions d'existence du modèle sont liées aux valeurs atteintes par les angles de dérive. De façon plus restrictive, les observateurs sont construits en faisant l'hypothèse de faibles dérives, ce qui n'est plus le cas à haute vitesse (notamment au moment d'un tête à queue, où la dérive arrière est supérieure à  $40^\circ$ ). Bien que les observateurs soient robustes vis-à-vis de valeurs importantes pour  $\beta$ ,  $\beta_F$  et  $\beta_R$ , les commandes sont d'autant plus performantes que ces valeurs restent limitées. La modélisation dynamique dans le plan de lacet (2.7) permet d'extraire une relation entre vitesse et angles de dérive, autorisant alors la modération de la vitesse pour contraindre l'évolution des angles de dérive et conserver de façon certaine le modèle cinématique étendu dans un domaine de stabilité (i.e. commandable).

- Gestion de défaillance et de précision des capteurs. Un point important en pratique réside dans la disponibilité et la précision des mesures utilisées pour l'asservissement (voir notamment [Del10], qui intègre à la notion de traversabilité la précision des capteurs). Les performances des systèmes de perception peuvent dépendre des vitesses atteintes. En effet, les vibrations ou chocs engendrent, notamment pour les capteurs extéroceptifs, des données erronées. Par ailleurs, certains capteurs peuvent perdre brutalement leur précision (perte du mode temps réel d'un GPS, ou perte de communication entre robots) ou dériver (navigation à l'estime) et ne plus fournir d'informations pertinentes. Ceci dégrade les performances réelles, tant au niveau des informations traitées directement par les lois de commande que par les informations utilisées par les observateurs (provenant dans le cas d'ObsDyn de plusieurs capteurs). Compte tenu de la connaissance de la précision des capteurs, il est envisageable de connaître la précision résultante du positionnement, et donc du suivi. Ceci peut permettre de lier la vitesse à la précision de la perception par analogie avec la notion de traversabilité (la zone est traversable à telle vitesse et la précision demandée est atteignable à telle vitesse).
- Préservation de la précision. Si le maintien de la précision est vu dans le point précédent par l'intermédiaire des performances de la perception, on peut constater que la précision dépend aussi de la configuration et notamment de l'admissibilité de la trajectoire de référence en fonction de la vitesse. Ainsi, dans les transitoires de courbure (durant un test de la baïonnette par exemple), des erreurs ponctuelles de suivi peuvent intervenir du fait de l'impossibilité dynamique de suivre la trajectoire (une trajectoire sinusoïde apprise à 1 m/s ne peut être suivie à 4m/s). Là encore, en exploitant le modèle dynamique et en le transformant pour exprimer la dérivée seconde de l'écart latéral  $\ddot{y}$ , il devient possible d'intégrer les phénomènes dynamiques dans une expression d'écart latéral. La vitesse peut alors être modulée afin de garantir les performances du robot en terme de suivi (en calculant la vitesse maximale admissible pour limiter la valeur l'écart latéral)

Ces exemples montrent la nécessité de prendre en compte plusieurs contrôleurs de maintien d'intégrité intervenant sur les mêmes variables et pouvant entrer en interaction. Un nombre important de modérations, potentiellement en conflit, devra alors nécessairement être mis en place pour éviter des situations aberrantes.

**De l'apport de variables additionnelles de commande** La généralisation de la notion de maintien d'intégrité évoquée précédemment, permet en outre d'approcher les limites physiques du robot. Ces différents mécanismes agissent préférentiellement sur la vitesse d'avance du robot, en intégrant ses limitations physiques intrinsèques ainsi que les conditions d'interaction avec l'environnement. Le cas où la vitesse garantissant l'intégrité de l'ensemble du système robotique est nulle signifie ainsi que les limites des capacités sont atteintes et que le robot ne peut réaliser la tâche qui lui est assignée. Ceci montre l'inadaptation du robot dans le contexte.

Dans ce cas de figure, il peut néanmoins être intéressant d'exploiter les commandes de maintien d'intégrité pour connaître le point limitant, amenant à l'arrêt du robot. En effet, en inversant les relations permettant le calcul des vitesses admissibles, il est possible de connaître les valeurs des paramètres qui auraient permis au robot de poursuivre sa tâche. Par exemple, l'inversion de la relation (2.75) nous permet d'accéder à la valeur de l'inclinaison maximale du sol pour évoluer à la vitesse de 1m/s, ou encore de connaître la hauteur maximale du centre de gravité  $h$  pour obtenir la condition  $v_2^{max} \neq 0$ .



De telles informations peuvent être exploitées de deux manières, pour la conception de système robotiques :

- Donner les valeurs cibles des paramètres pour la conception des robots (par exemple hauteur du centre de gravité).
- Extraire les variables sur lesquels il est intéressant d'agir ainsi que les valeurs à atteindre pour sortir de la situation d'arrêt

La dépendance entre commande et conception et leur influence réciproque est ici mise en lumière. Les principes de modération de commande pour le maintien d'intégrité sont alors exploitables pour orienter la conception d'un système robotique, soit dans les valeurs de cibles, soit, et c'est ce qui nous intéresse plus particulièrement ici, pour définir les mobilités de celui-ci. Ainsi, en reprenant l'exemple précédent sur la hauteur de  $h$ , le maintien d'intégrité nous renseigne sur le fait qu'il est intéressant sur le robot de pouvoir faire varier la hauteur du centre de gravité dont la commande peut être généralisée par corolaire sur la limitation de la vitesse pour le renversement. Dans ce cas de figure, cette commande sera en opposition avec la gestion de traversabilité, imposant une garde au sol minimale admissible (d'où la nécessité de gérer les différentes commandes).

### 3.3 Vers la conception mécatronique de systèmes reconfigurables

#### 3.3.1 Le cas de la robotique mobile en milieu naturel

##### 3.3.1.1 Mobilité additionnelle et commande

Afin de pouvoir accroître les capacités d'un robot, il apparaît judicieux de pouvoir modifier à la fois les paramètres de commande, ainsi que la configuration mécanique du robot. Comme il a été souligné précédemment, ces deux aspects n'interviennent pas de façon indépendante : les mécanismes autorisant la reconfiguration mécanique d'un robot génèrent des variables additionnelles de commande, qu'il convient d'asservir, et les limites extraites par la commande permettent d'orienter les choix de conception. En outre, les modifications de configurations et de contexte agissent sur les modèles, nécessitant alors des modifications des lois de commande. Enfin, dans l'optique du schéma de commande proposé sur la figure 2.61, la variabilité des risques identifiés impose plusieurs types de modulation pour le maintien d'intégrité, qu'il convient de gérer pour préserver la stabilité du système (voir ci-après).

Cette interaction étroite permet d'entrevoir un processus de conception et de commande de systèmes mécatroniques reconfigurables (comme schématisé sur le synoptique de la figure 3.2). A partir d'un modèle d'évolution a priori d'un robot et en s'inspirant de la structure de commande générale proposée au chapitre précédent, il est possible de définir les relations entre différentes variables et paramètres du système et les variables de commande. A partir de ces relations, et en fonction des besoins, on peut alors définir les valeurs limites des variables (saturations) ainsi que des valeurs cibles pour les paramètres du robot. Ceci permet alors :

- de connaître les valeurs cibles des paramètres pour orienter les choix de conception ou optimiser la conception en fonction de la commande.
- de sélectionner les paramètres qui doivent être modifiables pour atteindre les spécifications

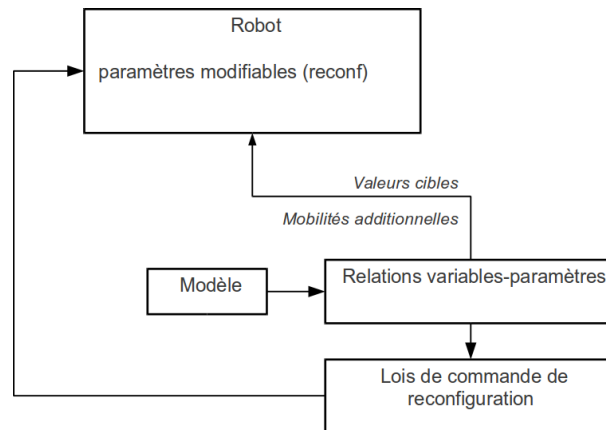


FIGURE 3.2 – Synoptique de l’approche de reconfiguration

désirées afin de réaliser la tâche robotique considérée. Les paramètres modifiables constituent alors des mobilités supplémentaires à concevoir sur le robot. La commande de celles-ci peut alors être réalisée par l’approche développée dans le chapitre précédent, à partir de la relation dynamique mise en évidence.

On peut ainsi concevoir un robot dont les propriétés et le nombre de variables de commande correspondent aux spécificités requises pour la tâche, et en disposant dans le même temps de relations mathématiques autorisant le pilotage de ces variables. Cette perspective méthodologique peut être illustrée par l’exemple du projet FAST<sup>1</sup>, dans lequel des dispositifs de stabilisation ont pour objet d’améliorer la stabilité dynamique.

Reprenons la relation (2.75), utilisée dans le cadre de la commande d’intégrité. Celle-ci a permis dans le chapitre précédent d’établir la vitesse d’évolution maximale admissible pour limiter le transfert de charge. Elle relie les variables du modèle (transfert de charge, inclinaison des masses suspendues et non suspendue, conditions d’adhérence) aux variables de commande (vitesse, angle de braquage) et aux paramètres du robot (hauteur du centre de gravité, propriétés des suspensions, ...). Il apparaît alors, qu’en introduisant une mobilité supplémentaire sur l’angle d’inclinaison de la masse suspendue  $\varphi$ , il est possible de moduler le risque de renversement tout en préservant la vitesse (voir notamment [KBA11]). A partir de cette relation, les valeurs de variations nécessaires peuvent être extraites, autorisant la conception d’un dispositif de pilotage de l’angle de roulis, illustré sur la figure 3.3. Ce robot est ici qualifié de reconfigurable dans le sens où la modification de l’angle de roulis est effectuée de manière lente et peut ainsi être considérée comme une variation paramétrique de la position du centre de gravité dans le plan de roulis.

Le pilotage de cette mobilité est alors envisagé, comme dans le cas du maintien d’intégrité, par le calcul du profil d’angle de roulis, en considérant les mêmes principes prédictifs que ceux utilisés dans la section 2.4. Le reste de la commande (commande des déplacements) peut être conservé, puisque la modification de l’angle de roulis est appréhendée dans les algorithmes d’observation comme une modification de l’angle  $\alpha$ .

On voit ainsi, qu’à partir des modèles utilisés pour la commande, il est possible de concevoir de nouvelles mobilités pour modifier les paramètres du robot, et d’en déduire leur pilotage pour adapter la configuration aux différentes situations rencontrées. On constate alors une interaction

1. projet de recherche dont la coordination scientifique est assurée par l’auteur et dont la description est détaillée dans la notice indiciduelle, annexe B

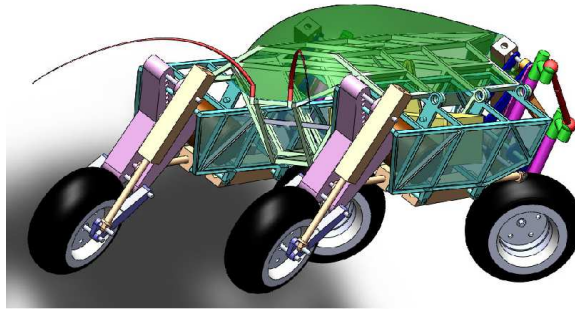


FIGURE 3.3 – Robot mobile reconfigurable développé à l'ISIR dans le cadre du projet FAST

entre le calcul de la vitesse maximale admissible et le calcul de l'angle de roulis à adopter. Ces deux calculs sont ici complémentaires, mais dans le cas général, un conflit peut survenir entre plusieurs type de commande.

### 3.3.1.2 Commutation, stabilité de la commande et supervision

Afin de gérer correctement (sans perte de stabilité) plusieurs lois de commande, il est nécessaire d'aller au-delà du simple bloc "Minimum" mis en place dans le schéma global de commande de la figure 2.61. En effet, ce type de commutation peut entraîner des instabilités liées aux transitions brutales dans les consignes ou dans les paramètres de lois de commande. Différentes méthodes permettent de considérer de telles commutations. Comme dans le cas de la coopération de robots, deux points de vue principaux sont mis en avant. Le premier peut être qualifié de décentralisé, pour lequel chaque commande est calculée séparément, et les commandes envoyées au robot sont issues d'un processus de compétition/pondération entre les lois (comme dans [SPB05]). Le second (centralisé) consiste à ne calculer que certaines lois de commande en fonction du contexte en utilisant la notion de superviseur. Plusieurs alternatives, qualifiées d'hybrides, et empruntant à ces deux concepts, peuvent être développées, afin de créer un compromis entre l'indépendance des lois de commande et leur coordination au sein d'une structure globale de commande.

Cette notion, comprise ici pour la navigation d'un robot, s'étend au niveau de plusieurs entités à gérer de façon coordonnées. La reconfiguration n'est donc plus confinée à un robot, mais à un système multi-robot, donc la conformation peut évoluer en fonction du contexte de la tâche. La supervision est alors vue comme un système de coordination entre les différentes entités (voir par exemple [CFK97] sur la supervision de systèmes coopératifs). Au-delà de la gestion d'une formation de robot ou de la coopération, l'association de plusieurs robots pour aboutir à un nouveau dispositif constitue une piste de recherche intéressante, dans le prolongement de la modification en ligne des propriétés mécaniques d'un unique robot. Plusieurs projets et travaux allant dans ce sens sont en cours, utilisant souvent des petites entités basiques modulaires (voir par exemple [SABI08] or [MK07]). L'adaptation devient alors très générique, puisqu'à partir d'éléments robotiques standards de petite taille, toute forme d'entité peut alors être générée, idéalement de façon autonome, afin de répondre à un problème posé. Si de telles initiatives constituent une réponse générique au problème de l'adaptabilité et de la flexibilité, celle-ci demeurent encore au niveau de concept et nécessite de nombreuses avancées d'un point de vue mécatronique, tant au niveau de la conception que de la commande, à l'échelle d'une entité comme à celle de l'ensemble.

### 3.3.2 Généralisation

Le principe de conception mécatronique de systèmes reconfigurables a ici été explicité sur le cas de robots mobiles évoluant en milieux peu structurés et par conséquent soumis à des dynamiques fortes et incertaines. L'adaptation du système robotique (ici considéré comme la configuration du robot et de sa commande) permettait de faire face à la forte variabilité des situations rencontrées dans le cadre de l'évolution en milieu naturel. Néanmoins, on constate que la modularité offerte par ce type d'approche permet d'adresser de nombreux autres cas d'application. En fait, cette piste de recherche peut être appliquée dans les cas où de fortes variabilités dans l'environnement sont présentes, mais également dans le cas où plusieurs tâches doivent être accomplies par un même dispositif, mais requérant une configuration différente. Que ce soit dans les domaines de la robotique mobile, de la robotique industrielle en passant par la robotique humanoïde, les principes mis en avant ici peuvent contribuer à une amélioration de l'autonomie, en mettant en place des mécanismes d'adaptation et de reconfiguration (voire d'association) à même d'adresser différentes situations dans des conditions de natures variables. A ce titre, des travaux sont en cours de démarrage sur la conceptions de tels dispositifs, que ce soit dans le champs d'application de l'épandage (voir le sujet de stage de Donatien Watremez, se poursuivant par une thèse fin 2011), ou par les travaux de thèse menée par Mathieu Richier (thèse [T4]), l'ambition est ici d'aboutir à une méthodologie plus générale de conception mécatronique.

## 3.4 Conclusion

Les travaux réalisés dans les activités de recherche montrent la pertinence des développements sur les principes de commandes adaptatives et prédictives pour l'asservissement de systèmes soumis à des dynamiques incertaines et fortement variables. La théorie développée autour du triptyque modélisation/observation/commande a permis de faire face à la problématique scientifique posée en adoptant des stratégies d'adaptation à différents niveaux. Appliquée principalement à la thématique des robots mobiles en milieux naturels, la démarche mise en œuvre est ainsi de prendre en compte différents phénomènes perturbants la dynamique des robots afin de les compenser, sans pour autant chercher à les caractériser de façon fine. Ceci permet de s'affranchir d'un nombre important de capteurs tout en conservant une haut degré de robustesse. Toutefois, devant les différentes tâches à effectuer (suivi de trajectoire, coopération, ...) et le nombre de fonctions à assurer pour garantir la précision et la stabilité des robots (traversabilité, renversement, ...), l'utilisation d'une loi de commande unique, ou du moins utilisant des réglages figés, peut se révéler insuffisantes. Par ailleurs, il est intéressant de noter que les méthodes utilisées permettent de rendre compte de la limitation physique des robots considérés, et d'analyser ainsi les points à optimiser ou les mobilités nécessaires. Ceci met alors à jour les limites d'une configuration (un robot et une commande associée) pour faire face à une variabilité importante de situations rencontrées.

Pour aller plus loin les recherches futures s'orientent donc naturellement vers le développement de plateformes robotiques reconfigurables, à la fois au niveau algorithmique (perception - commande) et au niveau mécanique (capacité de modification en ligne des propriétés mécanique du robot). Ceci nécessite la prise en compte de la commande dès le début du processus de conception, et suppose également des algorithmes de supervision de niveaux supérieurs afin de gérer les commutations entre différentes modalités. La notion de plateformes ne s'entend pas seulement

---

au niveau d'une entité unique, mais regroupe potentiellement plusieurs robots. Initiée dans ces travaux par l'intermédiaire de la commande de robot en formation, la notion de reconfiguration envisagée dans les travaux futurs comprend également cette vision coopérative. L'adéquation d'un système robotique à l'environnement et à sa tâche est alors envisagée non seulement à l'échelle d'une entité, mais d'un ensemble autonome capable de s'organiser pour répondre aux mieux aux besoins sociétaux.



**Annexe A**

**Dispositifs expérimentaux**

## A.1 Généralités

Afin de valider en vraie grandeur, les algorithmes d'observation et de commande développés au chapitre 2, plusieurs robots mobiles ont été utilisés. Cette diversité des robots utilisés permet de valider les aspects contrôle d'une formation de robots mobiles, mais également d'éprouver les performances sur des robots différents. En outre la généricité des approches développées a ainsi pu être évaluée. Trois robots, présentant des propriétés différentes ont donc été acquis et/ou développés par le Cemagref. De plus, un quad a été instrumenté pour valider les retombées des travaux généraux pour le développement de dispositifs d'aide à la conduite. Cette annexe présente ainsi les plateformes sur lesquelles les résultats décrits dans le chapitre 2 ont été obtenus. En outre, les capteurs utilisés sur ces plateformes sont listés dans la dernière section de cette annexe.

## A.2 Robots et véhicules utilisés pour la validation en conditions réelles

### A.2.1 Tracteur agricole robotisé [TR]

Cette première plateforme de test est dérivée d'un véhicule commercialisé : le tracteur Ares 620, construit par Renault-Agriculture (aujourd'hui devenu CLAAS) et présenté sur la figure A.1.



FIGURE A.1 – Tracteur Ares 620 automatisé

Afin de pouvoir tester les algorithmes de suivi de trajectoire sur des machines semblables à celles utilisées dans le milieu agricole (qui constitue une retombée applicative importante), ce tracteur a été modifié. L'hydraulique associée à la direction assistée a été modifiée afin de pouvoir asservir l'angle de braquage. Les actionneurs agissant sur la vitesse n'ont pas été modifiés pour permettre l'asservissement en vitesse. Sur cette plateforme, seuls les lois de commande sur l'angle de braquage peuvent donc être testées, en laissant la vitesse pilotée manuellement.

Les caractéristiques de cette plateforme sont les suivantes :



Masse ( $m$ )	7200kg
Empattement ( $L$ )	2.75m
Angle de braquage maximal	45°
Temps de réponse angle de braquage	0.8s
Vitesse maximale	12m/s

TABLE A.1 – Caractéristiques du tracteur Ares 620

## A.2.2 Arroco

### A.2.2.1 Robot seul [AS]

Ce robot est complètement électrique et a été conçu par la société RoboSoft. Présenté sur la figure A.2, il est doté de 4 roues directrices et motrices indépendantes. Il est capable d'évoluer dans des pentes allant jusqu'à 35° en atteignant une vitesse maximale de 4m/s. Plusieurs modes de commande permettent soit de commander la vitesse globale, soit les vitesses de rotation des 4 roues de façon indépendante.



FIGURE A.2 – Robot mobile Arroco

Ce robot permet donc d'éprouver toutes les lois de commande définies au chapitre 2, mais à vitesse modérée. Ses caractéristiques principales sont données dans le tableau A.2.

Masse ( $m$ )	600kg
Empattement ( $L$ )	1.2m
Angle de braquage maximal	25°
Temps de réponse angle de braquage	0.6s
Vitesse maximale	4m/s

TABLE A.2 – Caractéristiques du Robot Arroco

### A.2.2.2 Robot avec remorque [AR]

Le robot Arroco a été modifié afin de permettre l'attache d'une remorque expérimentale, autorisant la validation des algorithmes sur le suivi et le demi-tour d'un robot avec remorque (voir 2.3.2.3). La liaison tracteur remorque est dotée de trois capteurs d'angle permettant de connaître l'orientation relative de la remorque vis-à-vis du robot tracteur.



FIGURE A.3 – Robot mobile Arroco avec remorque

La remorque, illustrée sur la figure A.3, a été conçue par le Cemagref et permet différents réglages. Tout d’abord, la position de l’essieu est réglable, ce qui rend possible la modification de la distance  $L_3$  sur la figure 2.29. Ensuite plusieurs bidons de 40L peuvent être embarqués afin de modifier le poids sur l’essieu de la remorque pour valider la robustesse des algorithmes à des variations de masse. Enfin, des points de fixation autorisent le positionnement du point de mesure (capteur GPS) soit sur la remorque, pour contrôler le centre de l’essieu, soit sur le robot tracteur, en vue d’étudier la robustesse des algorithmes de commande du robot tracteur par rapport aux perturbations induites par le comportement de la remorque.

### A.2.3 RobuFAST [RF]

Le robot RobuFAST (présenté sur la figure A.4), a également été conçu par la société RoboSoft et est mis à disposition du consortium du projet FAST. Sa conception est similaire à celle d’Arroco. Les châssis sont similaires et les deux plateformes sont dotées des mêmes mobilités (4 roues directrices et motrices). Toutefois plusieurs modifications ont été apportées (roues, poids, actionneurs, ...) afin de lui permettre d’atteindre la vitesse de 8m/s.



FIGURE A.4 – Robot mobile RobuFAST

Les caractéristiques de ce robot sont données sur le tableau A.3. Il a été spécifiquement développé pour tester les algorithmes liés au contrôle des déplacements à haute vitesse (voir section 2.3.3.3).

Masse ( $m$ )	420kg
Empattement ( $L$ )	1.2m
Angle de braquage maximal	20°
Temps de réponse angle de braquage	0.4s
Vitesse maximale	8m/s

TABLE A.3 – Caractéristiques du Robot RobuFAST

### A.2.4 Quad expérimental

La dernière plateforme expérimentale utilisée pour tester la pertinence des algorithmes proposés dans ce mémoire est un quad MF400H, commercialisé par la société Massey Ferguson (voir figure A.5 et caractéristiques dans le tableau A.4). Celui-ci n'est pas automatisé et est utilisé uniquement dans le cadre du développement de dispositifs d'aide à la conduite pour le maintien de stabilité. Ces développements sont issus des mêmes principes que pour la commande des robots mobiles, mais dans une version modifiée (voir section 2.2.3.2). Ainsi, ce quad a été instrumenté de manière différente des plateformes robotiques (pour lesquels, la présentation des capteurs embarqués est reporté à la section A.3).



FIGURE A.5 – Quad expérimental

Deux types d'instrumentation distincts sont mis en place. La première catégorie est constituée de capteurs bas coûts (au regard du prix d'un tel quad), utilisés pour alimenter les algorithmes de détection du risque de renversement. Il s'agit ici d'une centrale inertielle bas coût (Xsens, utilisé pour accéder à la vitesse de lacet, et à l'inclinaison de la masse non suspendue  $\alpha$ ), un radar à effet Doppler (pour mesurer la vitesse d'avance  $v$ ) ainsi qu'un capteur filaire (donnant l'angle de braquage  $\delta_F$ ). Le second type de capteurs embarqués sur le quad est dédié à la mesure d'une réalité terrain pour évaluer la pertinence de l'estimation du risque de renversement. Il s'agit de dynamomètres tournants embarqués sur le moyeux des roues. Ces capteurs permettent de mesurer les efforts (forces et couples) au niveau de la jante. Une mesure précise des efforts normaux est donc disponible et une mesure du transfert de charge est ainsi déduite.

## A.3 Système(s) de perception

Afin de procéder à la commande des robots mobiles, plusieurs types de capteurs sont utilisés. Ceux-ci permettent de mesurer les variables utilisées pour alimenter les observateurs et par

Masse ( $m$ )	520kg
Empattement ( $L$ )	1.3m
Angle de braquage maximal	40°
Vitesse maximale	20m/s

TABLE A.4 – Caractéristiques du quad expérimental

conséquent les algorithmes de commande. La figure A.6 explicite les capteurs embarqués sur les robots mobiles, en prenant l'exemple du RobuFAST, qui constitue le robot équipé le plus complètement.

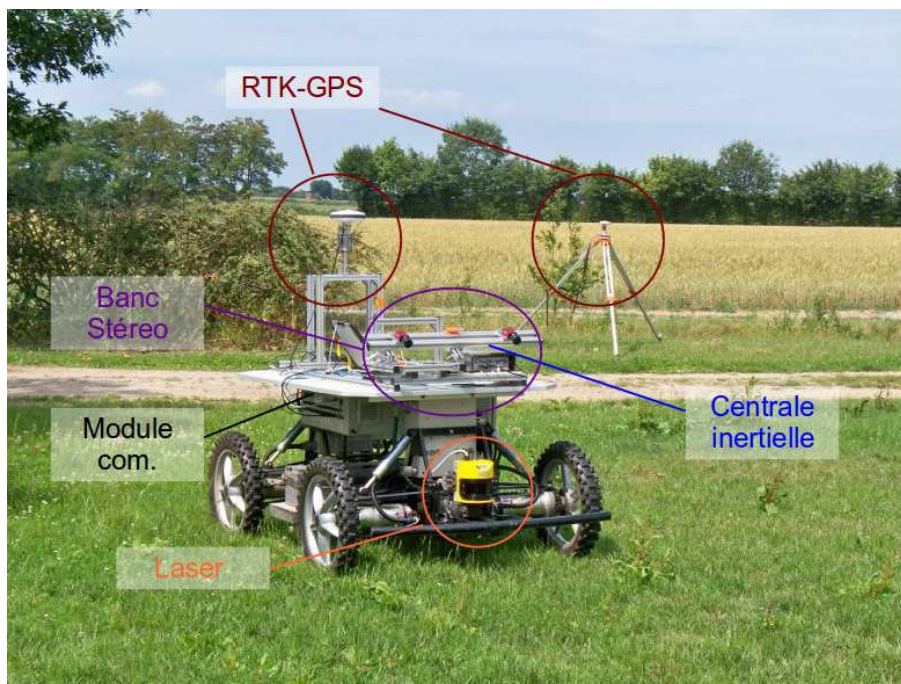


FIGURE A.6 – Capteurs embarqués - exemple du RobuFAST

La liste des capteurs embarqués est détaillée ci-après.

### A.3.1 GPS cinématique temps réel - GPS-RTK

Le capteur GPS cinématique temps réel permet de fournir l'information extéroceptive la plus importante. Deux modèles sont utilisés : un Aquarius de la société Thales et un Proflex de la société Magellan, fournissant les mêmes informations. L'antenne GPS mobile est capable, à partir d'une station de référence fixe, de fournir sa localisation avec une précision de  $\pm 2\text{cm}$  en longitude et latitude et  $\pm 5\text{cm}$  en altitude. Au delà de la localisation, le dispositif donne les vecteurs vitesses, qui permettent, via un filtre de Kalman relié au modèle du robot (ou à la centrale inertielle si celle-ci est présente), d'estimer le cap absolu. A partir de ces informations, l'état du robot par rapport à la trajectoire de référence est connu : le triplet  $(s, y, \tilde{\theta})$  ainsi que la vitesse du robot  $v$  ou  $v_2$  sont donc mesurés. Ceci permet de réaliser l'asservissement à basse vitesse en alimentant directement et indirectement (via l'observateur ObsCin) les lois de commande.

### A.3.2 Centrale d'attitude

Une centrale MTi commercialisée par la société Xsens est ici utilisée et embarquée sur l'avant du robot. Les informations fournies sont les 3 accélérations ainsi que les 3 vitesses de rotation. Bien que les informations angulaires sont directement accessibles par intégration, elles ne sont pas utilisées dans le cadre de ces travaux. Les informations exploitées ici sont principalement :

- la vitesse de lacet  $\dot{\theta}$ ;
- les accélérations latérales et verticales, couplées à la vitesse angulaire de roulis, qui par fusion permettent d'accéder à l'inclinaison  $\alpha$

Ces deux variables sont utilisées pour alimenter l'algorithme d'observation ObsDyn, pour la commande à haute vitesse et la gestion du risque de renversement.

### A.3.3 Module de communication sans fil

Afin de pouvoir réaliser le contrôle en formation d'une flotte de robots, ceux-ci doivent échanger des informations afin d'asservir les positions relatives. Ceci est assuré par l'intermédiaire de modules WIFI commercialisés par NetGear autorisant la mise en place d'un réseau sans fil. Ceux-ci peuvent être embarqués sur l'ensemble des robots.

### A.3.4 Perception de l'environnement

Il s'agit ici de construire un Modèle Numérique de Terrain pour analyser une grille d'élévation du sol devant le robot pour alimenter la gestion de traversabilité (détaillée en section 2.4.2). Deux types de dispositif assurant cette fonction sont embarquables sur les robots. Le premier est un banc stéréovision, dont la conception a été réalisée dans le cadre du projet FAST en collaboration avec le LAAS. Les algorithmes de construction du MNT sont alors directement issus de ce laboratoire de recherche. L'utilisation de la stéréovision peut également être utilisée à des fins de localisation. Le deuxième équipement est issu des travaux développés dans [MDCD10] et utilise la fusion d'information entre une caméra et la nappe Laser fournie par le télémètre Sick.

### A.3.5 Architecture temps réel

Afin d'assurer le traitement temps réel de ces informations et la bonne synchronisation des données l'architecture temps réel Aroccam<sup>1</sup> développée au Cemagref (voir [TCD<sup>+</sup>06]) est exploitée. Celle-ci permet d'assurer l'ordonnancement des données pour garantir la synchronisation en vue de la fusion. En outre, cette architecture permet de garantir le traitement en temps réel pour le calcul des algorithmes d'observation et de commande. Enfin, sa modularité permet de faciliter la gestion de plusieurs configurations du système de perception (utilisation ou non de la centrale inertielle, du module de communication, etc...).

---

1. Architecture d'Ordonnements de Capteurs pour la Création d'Algorithmes Modulaires



### A.3.6 Synthèse des dispositifs expérimentaux en fonction des applications

Chacun des robots peut être équipé des capteurs décrits ci-avant. Toutefois, tous les capteurs ne sont pas utiles pour toutes les applications et donc ne sont pas embarqués en pratique sur tous les robots. Le tableau A.5 récapitule les capteurs nécessaires en fonction de l'application, et recense les robots qui en sont équipés en pratique. Pour des raisons de concision, la désignation des robots dans ce tableau utilise leurs initiales définies dans les titres des sections. Les lignes de ce tableau peuvent être considérées comme des sommes de capteurs. Par exemple l'utilisation de la centrale inertielle pour les applications à haute vitesse nécessite les informations fournies par le capteur GPS-RTK.

	Déplacement basse vitesse	Gestion train arrière	Réalisation demit-tour	Déplacement Remorque	Commande en formation	Déplacement haute vitesse	Maintien stabilité	Gestion traversabilité
GPS cinématique	[TR] [AS] [RF]	[AS] [RF]	[AS] [RF]	[AT]				
Module de communication					[TR] [AS] [AT] [RF]			
Centrale inertielle						[RF]	[RF]	
Construction MNT						[RF]	[AS] [RF]	[AS] [RF]

TABLE A.5 – Tableau de synthèse de l'intégration des capteurs sur les plateformes en fonction des applications

# Annexe B

## Notice individuelle

### B.1 Curriculum Vitae

Marié, 32 ans, 2 enfants

#### Diplômes et qualifications

<b>2006</b>	<b>Qualification aux fonctions de Maître de Conférences pour la section 61 et la section 60</b>
<b>Novembre 2005</b>	<b>Docteur de l'université Blaise Pascal (Clermont II)</b>  Spécialité Vision et Robotique, thèse intitulée : « Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissements : application au suivi de trajectoire pour les engins agricoles ». Sous la direction de Philippe Martinet, professeur à l'IFMA, mention très honorable.
<b>Juin 2002</b>	<b>DEA Génie Mécanique, Génie Civil, Université Blaise Pascal (Clermont II)</b> Sur le thème : « Guidage automatique d'engins agricoles ».
<b>Juin 2002</b>	<b>Ingénieur IFMA (Institut Français de Mécanique Avancée, Clermont-Ferrand)</b> Orientation Mécatronique, Major de l'orientation, distingué dans les 10 premiers de la promotion 2002.

#### Parcours

<b>Depuis 2006</b>	<b>Chargé de Recherche au Cemagref - Groupement de Clermont-Ferrand</b>
<b>2006</b>	<b>Mobilité (6 mois) à l'Université de Lund, Département « Automatic Control » (Suède)</b>

- 2006**            **Ingénieur de Recherche au Cemagref, Groupement de Clermont-Ferrand (63)**  
chargé de l'initiation et du développement de deux projets de recherche sur la thématique de la modélisation et de la commande des agro-systèmes, et particulièrement en vue de la sécurité et de la sûreté.
- 2001**            **Projeteur à CMF (Conception Machine Faveyrial), Clermont-Ferrand (63)**  
Intégré au bureau d'étude en tant que stagiaire puis recruté en CDD.
- 2000**            **Projeteur à US Filter (WSL), Charleville-Mézières (08)**  
Intégré à une unité de montage en tant que stagiaire, puis au Bureau d'Etude en tant que CDD, pour un emploi de projeteur.

### Distinctions et participations

- Depuis 2009**    Membre du conseil scientifique du Thème de Recherche INSPIRE du Cemagref
- Depuis 2007**    Membre du groupe de travail « Robotics in Agriculture » IEEE – Robotics and Automation Society
- Depuis 2007**    Membre du GDR Robotique
- 2006**            Best Interactive Session Award lors de la conférence IEEE CDC2006 : 45th IEEE Conference on Decision and Control ([www.ieeecss.org/CAB/conferences/cdc2006/index.php](http://www.ieeecss.org/CAB/conferences/cdc2006/index.php))
- 2006**            Médaille d'argent de l'Académie d'Agriculture de France récompensant les meilleures thèses dans le domaine de l'agriculture ([www.academie-agriculture.fr](http://www.academie-agriculture.fr))



## B.2 Participation aux projets scientifiques

### Projets réalisés ou en cours

<b>Baudet-Rob - [P1]</b>	<b>Robot mobile d'assistance logistique pour une mobilité des groupes d'intervention plus efficace, plus réactive et plus sûre.</b>	
ANR - ASTRID-DGA	2012-2014	Accepté
Partenaires : Cemagref, LASMEA, Effidence		Portée : nationale
Rôle : Responsable de la partie commande du robot		Aide : 300.000€
<p>Descriptif : L'objectif de ce projet est de répondre aux problématiques scientifiques posées par le développement d'un engin mobile (SHERPA) chargé de transporter du matériel en suivant automatiquement, c'est-à-dire sans intervention humaine, un groupe de personnes.</p>		

<b>FAST - [P2]</b>	<b>Fast Autonomous Rover SysTem</b>	
ANR - Programme PSIROB	2008-2011	En cours
Partenaires : FR TIMS, LAAS, ISIR, RoboSoft		Portée : nationale
Rôle : Coordinateur du projet et responsable de l'axe commande		Aide : 853.000€
<p>Descriptif : Ce projet de recherche a pour ambition de concevoir un robot mobile terrestre tout terrain autonome, capable de se mouvoir à très haute vitesse (10m/s) en conservant son intégrité. Outre la coordination, les activités scientifiques dans le cadre de ce projet permettent de fédérer plusieurs des axes du projet global de recherche. Les avancées de ce projet sont détaillées sur le site Web du projet dont j'assure le suivi : <a href="https://projetfast.cemagref.fr/avancees">https://projetfast.cemagref.fr/avancees</a></p>		

<b>ActiSurTT -[P3]</b>	<b>Dispositifs actifs pour la sécurité des véhicules en environnement tout-terrain</b>	
ANR - Programme VTT	2011-2014	En cours
Partenaires : Cemagref, LSIS, Xlim, Lasmea, CCMSA, Cetim, Axema, PhiMeca, Grégoire, Po-clain Hydraulics		Portée : nationale
Rôle : Coordinateur pour les aspects scientifiques et responsable de la tâche « Synthèse de dispositifs de prévention des risques »		Aide : 1.321.600€
<p>Descriptif : Le projet de recherche ActiSurTT a pour objet de développer des dispositifs d'assistance à l'opérateur dédiés aux véhicules tout terrain et à même de prévenir les risques d'accidents inhérents à ces machines. Les situations accidentogènes particulièrement considérées dans ce projet seront le renversement (retournement et basculement), ainsi que le décrochement (perte d'adhérence menant par exemple au dévalement d'une pente).</p>		

<b>SafePlatoon - [P4]</b>	Sûreté de convois de véhicules autonomes	
ANR – Programme VTT	2011-2014	En cours
Partenaires : SeT, Cemagref, LASMEA, CIVITEC		Portée : nationale
Rôle : Intervenant dans la partie ”approches pour la commande en formation”		Aide : 827.000€
<p>Descriptif : Le projet a pour objectif global de concevoir un environnement scientifique et technologique permettant de développer des algorithmes de commande d’engins en coopération (de la simulation à la commande en passant par la simulation et la définition de systèmes de perception).</p>		

<b>[P5]</b>	Convention cadre CCMSA (2)	
Convention de Recherche	2010-2013	En cours
Partenaires : Cemagref, CCMSA		Portée : nationale
Rôle : Responsable de la fiche d’action Sécurité active		Aide : 100.000€
<p>Descriptif : La nature de ce projet général avec le Cemagref recouvre un grand nombre de thématiques. La partie me concernant est essentiellement centrée autour de la question de la stabilité dynamique. Elle participe ainsi au financement d’une thèse, sur l’extension et la généralisation des algorithmes de stabilité. En outre, elle ouvrira la voie sur la prise en compte de l’aspect humain et de l’acceptabilité des dispositifs d’assistance.</p>		

<b>[P6]</b>	Convention cadre CCMSA (1)	
Convention de Recherche	2007-2010	Achévé
Partenaires : Cemagref, CCMSA		Portée : nationale
Rôle : Responsable de la fiche d’action Sécurité active		Aide : 90.000€
<p>Descriptif : Dans le cadre de mes activités, ce projet a permis d’initier le volet de recherche sur la stabilité dynamique des engins tout-terrain (thèse de Nicolas Bouton). Au sein de ce projet, les algorithmes de reconstruction de métriques représentatives de la dangerosité ont pu être mis en œuvre et montrer l’intérêt des solutions robotiques.</p>		

<b>R2M [P7]</b>	Rover multi-modes pour une haute mobilité sur terrain accidenté	
PIR-Robea	2003-2006	Achevé
Partenaires : Lasmea, LAAS, Cemagref, LRP (à présent ISIR)	Portée : nationale	
Rôle : Intervenant sur le volet de recherche commande des déplacements	Aide : 136.000€	
Descriptif : L'objectif de ce projet était de démontrer les capacités de franchissement de structures de locomotions hybrides ainsi que leurs facultés d'adaptation autonomes aux variations géométricophysiques du sol.		

<b>CityHome [P8]</b>		
ICT-Asia	2008-2010	Achevé
Partenaires : FR TIMS, INRIA, Heudiasic, STJU (Chine), NTU (Singapoure), ISRC-SKKU (Corée), Kumammoto univ. (Japon)	Portée : internationale	
Rôle : Intervenant dans l'axe mobilité en milieu naturel		
Descriptif : Ce projet de coopération entre deux consortiums de recherche français et asiatique a pour objet le partage et la diffusion de connaissances entre les différents partenaires sur le contrôle de robots mobiles. Il s'agit donc ici de mener des développements communs sur certains axes du projet.		

<b>[P9]</b>	Etude de validité du code 4 OCDE (Structure de Protection des tracteurs)	
Convention OCDE/Cemagref	2008-2009	Achevé (suite en cours)
Partenaires : Cemagref, Université de Bologne (Italie), Scarlett Research (Grande Bretagne), ...	Portée : internationale	
Rôle : Responsable du développement d'outil de simulation	Aide : 20.000€	
Descriptif : L'objectif de ce projet est de valider et d'explorer les limites d'applicabilité du Code 4 de l'OCDE (visant à éprouver l'efficacité des structures de protection des tracteurs agricoles) face aux évolutions des agroéquipements.		

## B.3 Principales collaborations et éléments de rayonnement scientifique

### B.3.1 Echelle régionale

Collaboration au sein de la Fédération de Recherche TIMS. Les liens historiques entre l'Unité de Recherche TSCF et le LASMEA principalement, mais également avec le LaMI<sup>1</sup> et le LIMOS<sup>2</sup>

1. Laboratoire Mécanique et Ingénieries, Clermont-Ferrand

2. Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes, Clermont-Ferrand

ont permis de faciliter les développements réalisés mais aussi d'accroître leurs reconnaissances. Mes travaux s'inscrivent dans le cadre du projet V2I (Véhicules et Infrastructures Intelligents) qui englobe un volet « Véhicules en Milieux Naturels ». Le rôle important joué par l'UR TSCF tant au niveau des avancées scientifiques que de l'animation de ce collectif<sup>3</sup> lui confère de fait une stature à la fois régionale et nationale dans ce domaine de recherche. L'unité peut ainsi revendiquer des responsabilités grandissantes dans la communauté scientifique. Elle est ainsi passée, dans les projets de recherche nationaux d'envergure, du rôle de partenaire au rôle de coordinateur (comme le projet FAST, ou plus récemment le projet ActiSurTT), confirmant et renforçant son rayonnement.

### B.3.2 Echelle nationale

- Collaborations avec le LAAS, dans le cadre du projet FAST sur les aspects perception de l'environnement. Elles ont données lieu au développement d'un algorithme commun de navigation. Des travaux antérieurs communs sur la reconnaissance de texture notamment avaient permis ce rapprochement.
- Collaborations avec l'ISIR sur la détection et la compensation des glissements par répartition des vitesses de rotation des roues dans le cadre de FAST. Le développement commun de dispositifs mécatroniques reconfigurables est également en cours d'étude.
- Collaborations avec le Xlim<sup>4</sup> et le LSIS<sup>5</sup> sur les aspects observations et commandes adaptatives. Après de nombreux échanges, ces relations se sont concrétisées par le dépôt et l'acceptation du projet ActiSurTT [P3].
- Invitation à des séminaires du GDR MACS et de l'école des Mines
- Membre du GDR Robotique

### B.3.3 Échelle internationale

- Collaborations avec l'université de Lund. Suite au Post Doctorat effectué dans ce laboratoire, de nombreux contacts perdurent sur les aspects théoriques.
- Collaborations avec différents laboratoires asiatiques sur les aspects commande adaptative et reconfigurable dans le cadre des projets STAR SafeMove<sup>6</sup>, et le projet CityHome (voir [P7]).
- Collaborations avec l'UNSW (Australie) sur la comparaison entre différentes approches de commandes robustes. Initié par un séjour financé par l'université australienne ces travaux ont débouché sur l'écriture d'un projet refusé, mais les relations perdurent en vue d'un nouveau dépôt.
- Université de Bologne sur la simulation de résistance des structures de renversement.
- Participation au groupe de travail Robotics in Agriculture de l'IEEE - Robotics & Automation Society.

---

3. Le volet Véhicule en Milieux Naturels du projet V2I est animé par Michel Berducat, IR Cemagref de l'UR TSCF

4. UMR Université de Limoges – CNRS

5. Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes, Marseille.

6. Projet de Coopération « Science and Technology Amicable Research » entre la France et la Corée du sud sur la mobilité.

- Participation au montage d'un projet à soumettre à l'appel à projet de l'ERANET ICT-AGRI (Technologies de l'Information-Communication et de la Robotique pour l'Agriculture et l'Environnement). La coordination française est assurée par le Cemagref.
- Participation à un Workshop et aux activités de l'IARP (International Advanced Robotics Program)

### **B.3.4 Relations industrielles et société civile**

- Collaborations avec RoboSoft, Grégoire, Poclairn Hydraulics, dans le cadre de projets ANR.
- Collaborations avec Claas, sur les systèmes d'aide aux guidage.
- Collaborations avec la CCMSA dans un cadre partenarial (voir [P5] et [P6]).
- Relations avec John Deere (visites et réunions pour des travaux communs sur les aspects stabilité).
- Relations avec Agrotronix sur l'aide à la conduite (en cours de contractualisation).
- participation au pôle de compétitivité ViaMeca<sup>7</sup>, en particulier dans son volet "Systèmes intelligents et robotiques".

---

7. <http://www.viameca.fr/>

## B.4 Animation de la communauté scientifique

### Organisations de séminaires internes ou externes

<b>2010</b>	<b>Robotics 2010</b>
Membre du comité scientifique et d'organisation pour le Workshop Robotics 2010 qui s'est déroulé en préliminaire d'AgEng 2010, les 3 et 4 septembre 2010 sur les sites de Montoldre et Aubière	
<b>2009</b>	<b>Workshop du projet CityHome</b>
Membre du comité d'organisation d'un Workshop organisé dans le cadre du projet CityHome [P8] sur le site des Cézeaux avec démonstrations, les 28-29 octobre 2009	
<b>2009</b>	<b>Journée de restitution CCMSA</b>
Participation à l'organisation d'une journée de démonstration-restitution des travaux sur la stabilité dynamique d'engins légers tout-terrain avec constructeurs, institutionnels (représentant du ministère de l'agriculture et de l'inspection du travail) et presse le 11 décembre 2009 sur le site de recherche et d'expérimentation du Cemagref à Montoldre.	

### Participations à l'animation scientifique

<b>depuis 2009</b>	<b>Comité scientifique du TR Inspire</b>
Membre du comité scientifique auprès de l'animateur du Thème de Recherche	
<b>2008</b>	<b>Ecole d'été Image et Robotique</b>
Membre du comité d'organisation de l'école d'été franco-méxicaine image et robotique qui s'est déroulée à l'IFMA du 23 juin au 4 juillet 2008	
<b>depuis 2007</b>	<b>Membre du groupe de travail "Robotics in Agriculture" IEEE</b>
Participation et organisation de Workshop pour animer le groupe de Travail "Robotics in Agriculture" de l'IEEE Robotics and Automation Society.	
<b>depuis 2007</b>	<b>Membre du GDR Robotique</b>
Participation aux Workshops du Groupe de Recherche National Robotique et dans une moindre mesure du GDR MACS	
<b>depuis 2007</b>	<b>Représentant du personnel aux CAP CR</b>

### Evaluation de travaux scientifiques

Relecteur pour revues internationales (IEEE ITRO, IJRR, JFR) et conférences internationales (ICRA, IROS, CDC, IECON).

## B.5 Activités d'encadrement

### Post-Doctorats

<b>[PD1] Oliver Hach</b>	<b>Préservation de l'intégrité et de la contrôlabilité pour un asservissement fiable et sûr de véhicule en milieu naturel</b>	
	2009-2011	Achevé en juin 2011

### Thèses

<b>[T6] Dieumet Denis</b>	<b>Contribution à l'estimation du risque et au maintien de stabilité de machines en milieu tout terrain</b>	
DT : Roland Lenain (sous réserve de dérogation)	2011-2014	Financé sur [P3], début en septembre 2011
<b>[T5] Pierre Cartade</b>	<b>Commande en formation de véhicules agricoles</b>	
DT : Philippe Martinet (Lasmea)	2010-2013	En cours
<b>[T4] Mathieu Richier</b>	<b>Conception de dispositifs actifs de maintien de stabilité pour les véhicules évoluant en milieux naturels</b>	
DT : Christophe Debain (Cemagref)	2010-2013	En cours
<b>[T3] Christophe Cariou</b>	<b>Guidage autonome de véhicules agricoles avec ou sans outils traînés dans la ligne de travail et lors des demi-tours</b>	
DT : Philippe Martinet (Lasmea)	2007-2011	Soutenance prévue automne 2011
<b>[T2] Pierre Delmas</b>	<b>Génération active des déplacements d'un véhicule agricole dans son environnement</b>	
DT : Roland Chapuis (Lasmea)	2007-2011	Soutenue en février 2010
<b>[T1] Nicolas Bouton</b>	<b>Stabilité dynamique des véhicules légers tout-terrain. Nouvelles Solutions</b>	
DT : Philippe Martinet (Lasmea)	2007-2011	Soutenue en novembre 2009

## Stages et projets de fin d'étude

Année	Titre	Etudiant	Durée
2011	Caractérisation, modélisation et simulation de l'influence du terrain sur l'épandage en milieux naturels	Donatien Watremez - Ecole d'Ingénieur (IFMA - Clermont)	5 mois
2010	Prise en compte de la géométrie du terrain dans des algorithmes d'estimation et d'anticipation du transfert de charge d'engin tout terrain	Mathieu Richier - Ecole d'Ingénieur (ENSIL - Limoges)	5 mois
2010	Développement de modules de communication pour la coopération de robots mobiles en milieu naturel.	Arnaud Abonnât - Ecole d'Ingénieur (PolyTech' Clermont)	5 mois
2009	Contrôle d'une flotte de véhicules en milieu naturel	Johan Preynat - Ecole d'Ingénieur (ENISE - St Etienne)	5 mois
2008	Etude des structures de protection d'engins agricoles dans le cas de renversement sur pente non constante	Brice Amaré - Ecole d'Ingénieur (IFMA - Clermont)	5 mois
2007	Instrumentation d'un quad à l'aide de capteurs six composantes pour mesurer les efforts de contact roue-sol	Quentin Dozolme - Ecole d'Ingénieur (IFMA - Clermont)	5 mois
2006	Travaux exploratoires sur l'étude de la stabilité dynamique des quads	Nicolas Bouton - Ecole d'ingénieur (IFMA - Clermont)	5 mois
2005	Stabilité des véhicules agricoles (Etude de modèles analytiques et numériques ADAMS)	Nicolas Trouillet - Ecole d'ingénieur (IFMA - Clermont)	5 mois
2004	Modélisation dynamique d'engins agricoles en présence de glissement	Nicolas Raguènes - Ecole d'ingénieur (IFMA - Clermont)	5 mois
2004	Guidage automatique d'engins agricoles par GPS et capteurs additionnels	Frédéric César - Ecole d'ingénieur (MATMECA - Bordeaux)	3mois



**Enseignements**

Année	Intitulé	Niveau	Nb ETD/an
A partir de 2011	Participation à la construction de l'UV Commande des systèmes non linéaire et interventions (3ième année IFMA)	Bac+5	40
2011	Mécanique des milieux continus (1ième année IFMA)	Bac+5	20
Depuis 2009	Etalonnage et identification des systèmes (3ième année IFMA)	Bac+5	30
Depuis 2009	Suivi de projet étudiants et stages à l'étranger (avec partenaires internationaux)	Bac+5	30
2009	Suivi de projet étudiants	Bac+5	15
Depuis 2005	Sciences pour l'Ingénieur	Bac+8	1
2005	Mécanismes et Robotique (2ième année IFMA)	Bac+5	16
2005	Etalonnage et identification des systèmes (3ième année IFMA)	Bac+5	20
2005	Méthodologie de conception et d'innovation (1ère et 2ième années IFMA)	Bac+5	46
2004	Mécanismes et Robotique (2ième année IFMA)	Bac+5	16
2004	Méthodologie de conception (1ère année IFMA)	Bac+5	20
2004	Méthodologie d'Innovation et de Conception (2ième année IFMA)	Bac+5	10
2004	Etalonnage et identification des systèmes (3ième année IFMA)	Bac+5	20

### B.5.1 Participations à la rédaction de projets

hors projets financés dont la liste est détaillée en section B.2.

<b>Ceres</b>	<b>Commande d'un Ensemble de Robots en Environnement non Structuré</b>	
ANR – Jeunes Chercheurs	dépôt en 2007, puis 2008	Refusé
Partenaires : Cemagref, Lasmea, Limos		Portée : nationale
Rôle : Coordinateur, puis responsable d'axe de recherche		Aide : 180.000€
Descriptif : Développement d'une architecture de communication et de contrôle dédiée à la commande de robots mobiles hétérogènes en formation. Le projet se focalisait autour des problématiques suivantes : prise en compte de la qualité de service dans les communications, le développement de commandes adaptatives à l'échelle d'un véhicule et de l'ensemble de la flotte, évitement coordonné d'obstacles.		

<b>Steco</b>	<b>Smart and Robust Technology for COoperation of robots</b>	
Européen – FP7 – STIC	dépôt 2008, puis 2009	Refusé
Partenaires : Cemagref, ARTTIC, LASMEA, UHOH (Allemagne), CRPHT (Luxembourg), Orebro Univ (Suède), CLAAS (Allemagne)		Portée : Internationale
Rôle : Intervenant dans la partie commande en formation		Aide : 3.073.100€
Descriptif : La problématique globale de ce projet était la robustesse et la flexibilité d'algorithmes de coopération d'entités robotiques hétérogènes.		

<b>Robust control methodologies for precise guidance of off-road articulated vehicles under the influence of slip : An extended kinematic model approach.</b>		
ARC Discovery (Australie)	dépôt en 2009	Refusé
Partenaires : UNSW (Australie), Cemagref		Portée : Internationale
Rôle : Intervenant dans l'axe commande		Aide : 728.000 AUD
Descriptif : Ce projet de recherche visait à synthétiser des lois de commande robustes capables d'asservir avec précision un robot mobile tout terrain. Plus particulièrement, il s'agissait, à partir des modèles hybrides définis, d'appliquer plusieurs stratégies de commande (mode glissant, adaptative, prédictive, grand gain, ...).		

## B.6 Publications de l'auteur

### B.6.1 Synthèse des publications

La répartition des publications suit la classification du Groupe de Recherche en Robotique établie dans son document de référence en 2008 intitulé : "Stratégie de publication et évaluation des chercheurs en Robotique". En ce qui concerne les conférences, la notion de rang B n'existant pas dans le document de référence, il s'agit dans le tableau suivant des conférences internationales à comité de lecture non référencées par le GDR. Les autres conférences internationales correspondent à celles acceptées sur résumé.

	Intern. rang A	Intern. rang B	Intern. autres	Nat.	<b>Total Ss thèse</b>	Total Avec thèse
Reuves	2	3	1	2	<b>7</b>	8
Chapitre d'ouvrage	1				<b>0</b>	1
Conférences	26	5	14	8	<b>42</b>	53
Conférences invité	1			8	<b>1</b>	1
Workshops	5				<b>3</b>	5

### B.6.2 Liste de publications

#### Reuves internationales de rang A

RIa2	2011	H. Fang, L. Dou, J. Chen, R. Lenain, B. Thuilot and P. Martinet, "Robust anti-sliding control of autonomous vehicles in presence of lateral disturbances", in Control Engineering Practice, Elsevier Science Publishers, vol.19, n°5, pp.468-478, May 2011
RIa1	2006	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet High accuracy path tracking for vehicle in presence of sliding : Application to farm vehicles automatic guidance for agricultural task. Autonomous Robots, Kluwer Academic Publishers vol. 21 n°1, pp 79-97.

#### Reuves internationales de rang B

RIb3	2010	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Mixed kinematic and dynamic sideslip angle observer for accurate control of fast off-road mobile robots . Journal of Field Robotics, 27(2) : 181-196
RIb2	2009	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations. Journal of Field Robotics 26(6-7) : 504-518
RIb1	2008	N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot, P. Martinet Backstepping observer dedicated to tire cornering stiffness estimation : Application to an All Terrain Vehicle and a farm tractor. Advanced Robotics, Vol. 22, No. 12. (2008), pp. 1267-1285.

--	--	--

### Revue internationale hors classement GDR

RIc1	2007	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Adaptive and Predictive Path Tracking Control for Off-road Mobile Robots. European Journal of Control, Vol 13 N°4, pp419-439, 2007.
------	------	--

### Revue Nationales

RN2	2007	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat, Philippe Martinet Commande de véhicules en présence de glissement : Application au suivi de trajectoire d'engins agricoles. Revue d'Auvergne, « Prix du jeune Chercheur, millésime 2007 » Tome 121, pp187-205, Société des Amis des Universités de Clermont-Ferrand, Alliance universitaire d'Auvergne, ISBN 2-9507585-6-8, 2007.
RN1	2003	Roland Lenain, Michel Berducat and Christophe Cariou Guidage d'engins agricoles par GPS - Amélioration des performances sur terrain non plat et en présence de glissement. In Revue Ingénierie N°spécial 2003, Cemagref éditions.

### Chapitre d'ouvrage

Ch1	2006	Benoit Thuilot, Roland Lenain, Philippe Martinet, Christophe Cariou Accurate GPS-based guidance of agricultural vehicles operating on slippery grounds. Chapter 6 in "Focus on Robotics and Intelligent Systems Research", pp185-239, John Liu editor, Nova Science Publisher, ISBN 1-59454-594-4, 2006.
-----	------	---

### Conférences Internationales à Comité de Lecture.

CIa26	2011	O. Hach, R. Lenain, B. Thuilot, P. Martinet Avoiding steering actuator saturation in off-road mobile robot path tracking via predictive longitudinal velocity control. IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), San Francisco (CA), USA, September
CIa25	2011	M. Richier, R. Lenain, B. Thuilot, C. Debain On-line estimation of a stability metric including grip conditions and slope : Application to rollover prevention for All-Terrain Vehicles. IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), San Francisco (CA), USA, September

CIa24	2011	R. Lenain, B. Thuilot, O. Hach, P. Martinet High-speed mobile robot control in off-road conditions : a multi-model based adaptive approach, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'11, pp. 6143-6149, Shanghai, China, 9-13 May, 2011
CIa23	2011	O. Hach, K. Müller, R. Lenain An Experimental Mobile Robot Platform for the Study of Dynamic Effects and High Speed Control, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'11, pp. 5523-5528, Shanghai, China, 9-13 May, 2011
CIa22	2010	R. Lenain, E. Lucet, C. Grand, B. Thuilot, F. Ben Amar Accurate and stable mobile robot path tracking algorithm : An integrated solution for off-road and high speed context IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), pp 196-201, Taipei, Taiwan, 18-22 october 2010
CIa21	2010	C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot, P. Martinet (2010) Path following of a vehicle-trailer system in presence of sliding : Application to automatic guidance of a towed agricultural implement, IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), pp4976-4981, Taipei, Taiwan, 18-22 october 2010.
CIa20	2010	R. Lenain, J. Preynat, B. Thuilot, P. Avanzini and P. Martinet, Adaptive formation control of a fleet of mobile robots : application to autonomous field operations, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'10, pp.1241-1246 , Anchorage, USA, 3-8 May, 2010
CIa19	2010	C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot and P. Martinet Autonomous maneuver of a farm vehicle with a trailed implement : motion planner and lateral-longitudinal controllers, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'10, pp. 3819-3824, Anchorage, USA, 3-8 May, 2010
CIa18	2010	N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot and P. Martinet A new device dedicated to autonomous mobile robot dynamic stability : application to an off-road mobile robot, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'10, pp. 3813-3818, Anchorage, USA, 3-8 May, 2010
CIa17	2009	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Multi-Model Based Sideslip Angle Observer : Accurate Control of High-Speed Mobile Robots in Off-Road Conditions. IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), pp. 1197-1202, St Louis, MO, USA.

CIa16	2009	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Motion Planner and Lateral-Longitudinal Controllers for Autonomous Maneuvers of a Farm Vehicle in Headland. IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), pp. 5782-5787, St Louis, MO, USA.
CIa15	2009	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet An active anti-rollover device based on Predictive Functional Control : Application to an All-Terrain Vehicle.,IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'09, pp 1309-1314, Kobe, Japan.
CIa14	2008	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet A rollover indicator based on a tire stiffness backstepping observer : application to an all-terrain vehicle. IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), Nice, France, 22-26 september 2008
CIa13	2008	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Adaptive control of four wheel steering off road mobile robots : application to path tracking and heading control in presence of sliding. IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), Nice, France, 22-26 september
CIa12	2008	Lenain, R., Robertsson, A., Johansson, R., Shiriaev, A., Berducat, M. A velocity observer based on friction adaptation. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3365-3370 (Pasadena, USA)
CIa11	2007	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Backstepping observer dedicated to tire cornering stiffness estimation : Application to an All Terrain Vehicle and a farm tractor. In Proc. of IEEE International Conference on Intelligent RObots and Systems IROS2007, pp 1763-1768 (San Diego, CA, USA)
CIa10	2007	N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot, J-C. Fauroux A rollover indicator based on the prediction of the load transfer in presence of sliding : application to an All Terrain Vehicle. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA2007, pp 1158-1163 (Roma, Italy)
CIa9	2006	R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet Mobile robots control in presence of sliding : Application to agricultural vehicle path tracking. In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, CDC'06, pp 6004-6009 (San Diego, California, USA)

CIa8	2006	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Sideslip angles observer for vehicle guidance in sliding conditions : Application to agricultural path tracking tasks. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA2006, pp 3183-3188, (Orlando, Floride, USA)
CIa7	2005	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Model Predictive Control for vehicle guidance in presence of sliding : Application to farm vehicles path tracking. In Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA2005, pp 897-902 (Barcelone, Espagne)
CIa6	2005	Fang Hao, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Robust Adaptive Control of Automatic Guidance of Farm Vehicles in the Presence of Sliding. In Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA2005, pp 3113-3118 (Barcelone, Espagne)
CIa5	2005	Fang Hao, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Trajectory Tracking Control of Farm Vehicles in Presence of Sliding. In Proc. of IEEE International Conference on Intelligent RObots and Systems IROS2005, pp 1720-1725 (Edmonton, Canada)
CIa4	2004	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Adaptive and predictive non linear control for sliding vehicle guidance : Application to trajectory tracking of farm vehicles relying on a single RTK GPS. In Proc. of IEEE International Conference on Intelligent RObots and Systems IROS2004, pp455-460 (Sendai, Japan)
CIa3	2004	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet A new nonlinear control for vehicle in sliding conditions : Application to automatic guidance of farm vehicles using RTK GPS. In Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA2004, vol. 5 : pp 4381-4386 (New Orleans, Lousiana, USA)
CIa2	2003	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Rejection of sliding effects in car like robot control : Application to farm vehicle guidance using a single RTK GPS sensor. in Proc. of IEEE International Conference on Intelligent RObots and Systems IROS2003, vol. 4 : pp3811-3616 (Las Vegas, Nevada, USA)
CIa1	2003	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Adaptive control for car like vehicles guidance relying on RTK GPS : Rejection of sliding effects in agricultural applications. in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA2003, vol 1 : pp115-120 (Taippeï, Taïwan)

--	--	--

### Conférences invité

Cinv1	2011	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet. Generic algorithm for high accurate trajectory control in different conditions, IROS Workshop on Perception and Navigation for Autonomous Vehicles in Human Environment, San Francisco, CA, USA, 2011.
-------	------	---

### Conférences Internationales à Comité de Lecture non répertoriées par le GDR Robotique

CIb5	2010	C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot and M. Berducat Autonomous Maneuvers of a farm vehicle with a trailed implement in headland, in Proceedings of International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO'10, pp109-114, Funchal, Portugal, 15-18 June 2010
CIb4	2008	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Commande d'un véhicule à 4 roues directrices en milieu naturel : application au suivi de trajectoires pour les engins agricoles. Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2008), Bucarest, Roumanie, 3-5 septembre 2008
CIb3	2008	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Développement d'un indicateur de risque de renversement destiné aux véhicules tout-terrain. Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2008), Bucarest, Roumanie, 3-5 septembre 2008
CIb2	2007	R. Lenain, A. Robertsson, R. Johansson, A. Shiriaev, M. Berducat A velocity estimator relying on friction observer : application to inverted pendulum stabilization. In Proceedings of Non Linear Control Systems (NOLCOS2007), pp 850-855 (Pretoria, South Africa)
CIb1	2006	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Commande de véhicules en présence de glissement : Application au suivi de trajectoire d'engins agricoles. In Proc. IEEE Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA 2006 (Bordeaux, France)

### WorkShops

WS5	2009	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Automatic reverse turn of agricultural vehicles : a predictive approach. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'09, Workshop on Autonomous Agriculture, Kobe, Japan, May 2009.
-----	------	---



WS4	2008	Lenain, R. ; Thuilot, B. ; Cariou, C. ; Martinet, P. Advanced path tracking control for off-road mobile robots. IEEE/RSJ International conference on Intelligent robots and system - Workshop on modeling, estimation, path planning and control of all-terrain mobile robots, Nice, France, 22-26 september 2008
WS3	2008	Roland Lenain, Christophe Debain, Benoit Thuilot, Roland Chapuis, Michel Berducat Accurate and Reliable Navigation Algorithm for Off-Road Mobile Robots. ARP Workshop on Environmental Maintenance and Protection, 22 – 23, 2008 (Baden-Baden)
WS2	2005	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat, Philippe Martinet Adaptive and predictive control for off-road mobile robots path tracking. 3rd Swedish Workshop on Autonomous Robotics (SWAR 2005), 1-2 septembre 2005, (Stockolm, Suède)
WS1	2004	Roland Lenain Agriculture vehicle guidance under sliding effect 1st Korea-France Symposium on dependable robotic navigation, 4-5 Octobre 2004, (Sung-KyunKwan University, Séoul, Corée)

**Conférences internationales acceptées sur résumé)**

CIc15	2010	R. Lenain, E. Hugo, T. Langle Sensitivity of the absorbed energy into a ROPS during a rollover situation : Comparison to the security level proposed into OECD Code 4, in Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering, AgEng'10, Clermont-Ferrand, France 6-8 September 2010
CIc14	2010	N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot, P. Martinet and M. Berducat New active safety device dedicated to light all-terrain vehicle stability : Application to quad bike and off-road mobile robot, in Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering, AgEng'10, Clermont-Ferrand, France 6-8 September 2010
CIc13	2010	C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot, T. Humbert and M. Berducat Maneuvers automation for agricultural vehicle in headland, in Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering, AgEng'10, Clermont-Ferrand, France 6-8 September 2010
CIc12	2010	C. Debain, P. Delmas, R. Lenain, R. Chapuis Integrity of an autonomous agricultural vehicle according the definition of trajectory traversability, in Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering, AgEng'10, Clermont-Ferrand, France 6-8 September 2010

CIc11	2009	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat An anti-rollover device dedicated to All-Terrain Vehicle lateral stability : Application to a quad bike. ITT 2009
CIc10	2009	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat Automatic guidance of agricultural vehicles in headlands : maneuvers generation and motion control. XXXIII CIOSTA-CIGR Section V Conference and IUFRO Workshop, 17-19 june 2009, Reggio calabria, Italy
CIc9	2009	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat An anti-rollover device dedicated to All-Terrain Vehicle lateral stability : Application to a quad bike. XXXIII CIOSTA-CIGR Section V Conference and IUFRO Workshop, 17-19 june 2009, Reggio calabria, Italy
CIc8	2009	Michel Berducat, Christophe Debain, Roland Lenain, Christophe Cariou Evolution of agricultural machinery : the third way. Joint International Agricultural Conference, Wageningen, Germany.
CIc7	2008	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat High accuracy path tracking of a four-wheel-steering all-terrain vehicle on a slippery slope. International conference on agricultural engineering (Ageng'2008), OP-1580, Hersonissos, Greece
CIc6	2008	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat A rollover indicator dedicated to all-terrain vehicles including sliding effects and pilot behavior. International conference on agricultural engineering (Ageng'2008), OP-1000, Hersonissos, Greece
CIc5	2008	Christophe Cariou, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat Automatic guidance of a four-wheel-steering vehicle. 66th International Conference on Agricultural Engineering, Hoenheim, Allemagne.
CIc4	2007	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Jean-Christophe Fauroux, Benoit Thuilot Dynamic modelling of All Terrain Vehicles designed for dynamic stability analysis. In Proceedings of MULTIBODY DYNAMICS 2007, ECCOMAS Thematic Conference (Milano, Italy)
CIc3	2005	Roland Lenain, Gerhard Nienaber High accurate GPS guidance for tractors under sliding conditions. In Proc. Of 63rd International Conference on Agricultural Engineering, Novembre 2005, pp. 467-474 (Hannovre, Allemagne)
CIc2	2004	Fang Hao, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Philippe Martinet Sliding Mode Control of Automatic Guidance of Farm Vehicles in the Presence of Sliding. In Proc. of IEEE International Symposium on Robotics and Automation, ISRA 2004, pp582-587, (Queretaro, Mexique)
CIc1	2004	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet Non-Linear control for car like mobile robots in presence of sliding : Application to guidance of farm vehicles using a single RTK GPS. In Proc of International Symposium on Robotics ISR2004, (Paris Nord-Villepinte, France)

--	--	--

### Conférences nationales

CN7	2011	Roland Lenain Présentation du projet FAST, Grand colloque ANR STIC, Paris, Janvier 2011
CN6	2010	Roland Lenain Présentation du projet FAST, Grand colloque ANR STIC, Paris, Janvier 2010
CN5	2009	Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot, Michel Berducat, Philippe Martinet An anti-rollover device dedicated to All-Terrain Vehicle lateral stability : Application to a quad bike, Symposium International "Innovations Technologiques et Systèmes de Transports ITT'09, Paris, Octobre 2009
CN4	2008	Roland Lenain Commande de véhicules en présence de glissement : Application au suivi de trajectoire d'engins en milieu naturel. Réunion jointe GT4 – GDR MACS, GTUAV, GDR Robotique, Paris, France
CN3	2006	Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, Philippe Martinet, Michel Berducat, Roland Chapuis, Frédéric Chausse, Cédric Tessier, Christophe Debain Robot mobile tout-terrain pour l'évaluation de lois de commande dédiées au suivi de trajectoire de véhicules dans le cadre de la mobilité accrue. In Journées EEA de la section automatique, démonstrateurs en automatique (Angers, France)
CN2	2005	Roland Lenain Suivi de trajectoire haute précision pour les véhicules tout-terrains. 9ième Journée Scientifique de l'Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur « Véhicules intelligents », pp81-92 (Clermont-Ferrand, France)
CN1	2003	Roland Lenain Contrôle de la mobilité de véhicule en présence de glissement par RTK-GPS. In Proc. Of journée Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur (Clermont-Ferrand, France)



# Bibliographie

- [ANCB95] B. d' Andréa-Novel, G. Campion, and G. Bastin. Control of wheeled mobile robots not satisfying ideal velocity constraints : a singular perturbation approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 5(4) :243–267, 1995.
- [AS97] A. Astolfi and W. Schaufelberger. State and output feedback stabilization of multiple chained systems with discontinuous control. *Systems and Control Letters*, 32(1) :49–56, 1997.
- [AW94] K.J. Astrom and B. Wittenmark. *Adaptive control (2nd edition)*. New York : Addison-Wesley, 1994.
- [BA98] T. Balch and R. Arkin. Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6) :926–939, 1998.
- [BAB95] F. Ben Amar and P. Bidaud. Dynamic analysis of off-road vehicles. In *Intern. symp. on experimental robotics*, Stanford, U.S.A., 1995.
- [BDLC] M. Berducat, C. Debain, R. Lenain, and C. Cariou. Evolution of agricultural machinery : the Third way. In *Joint International Agricultural Conference - JIAC 2009*.
- [BLTM10] N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet. A new device dedicated to autonomous mobile robot dynamic stability : application to an off-road mobile robot. pages 3813–3818, 2010.
- [BMGD04] M. Bouteldja, N.K. M'Sirdi, S. Glaser, and V. Dolcemascolo. Stability analysis and rollover scenario prediction for tractor semi-trailer. In *Intern. conf. on advances in vehicle control and safety (avcs)*, Genes, Italie., 2004.
- [BNP87] E. Bakker, L. Nyborg, and H.B. Pacejka. Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies. In *Congrès international de la société des ingénieurs de l'automobile (sae)*, pages 2190–2204, Warrendale, Pensylvanie (USA), 1987.
- [Bou09] N. Bouton. All-terrain vehicles dynamic stability. new solutions : Application to light vehicles like quad bike. page 180. Doctorat Vision et Robotique, Univ. Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, 2009.
- [Bro83] R.W. Brockett. Asymptotic stability and feedback stabilization. *Progress in math*, 27 :181–191, 1983.
- [Bru03] Jelle Bruinsma. World agriculture : towards 2015/2030. An FAO perspective. Technical report, Food and Agriculture Organisation, 2003.
- [BSWR05] S. Blackmore, B. Stout, M. Wang, and B. Runov. Robotic agriculture - the future of agricultural mechanisation ? *5th European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Upsala (Sweden), 2005.

- [BTMM05] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, and P. Martinet. A global control strategy for urban vehicles platooning relying on nonlinear decoupling laws. In *Ieee/rsj international conference on intelligent robots and systems (iros), edmonton (canada)*, pages 2875–2880, 2005.
- [CBAN93] G. Campion, G. Bastin, and B. d'Andréa-Novel. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. In *Ieee international conference on robotics and automation*, pages 462–469, Atlanta, Georgia (USA), 1993.
- [CdWOAL95] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, and P. Lischinsky. A new model for control of systems with friction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(3) :419–425, 1995.
- [CdWS92] C. Canudas de Wit and O.J. Sordalen. Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 37(11) :1791–1797, 1992.
- [CFK97] Y. Cao, A. Fukunaga, and A. Kahng. Cooperative mobile robotics : antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 4(1) :7–27, 1997.
- [CLBT10] C. Cariou, R. Lenain, M. Berducat, and B. Thuilot. Autonomous maneuvers of a farm vehicle with a trailed implement in headland. volume 2, pages 109–114, 2010.
- [CLO02] L.M. Corradini, T. Leo, and G. Orlando. Experimental testing of a discrete-time sliding mode controller for trajectory tracking of a wheeled mobile robot in the presence of skidding effects. *Journal of Robotic System*, 19(4) :177–188, 2002.
- [CLTB09] C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot, and M. Berducat. Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations. *Journal of Field Robotics*, 26(6-7) :504–518, 2009.
- [CLTM08] C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet. Adaptive control of four-wheel-steering off-road mobile robots : Application to path tracking and heading control in presence of sliding. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1759–1764, Nice, France, 2008.
- [CLTM10] C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet. Path following of a vehicle-trailer system in presence of sliding : application to automatic guidance of a towed agricultural implement. pages 4976–4981, 2010.
- [col01] collectif. *La robotique mobile*. Hermès Science Publications, 2001.
- [col11] collectif. *Robotique Industrielle*. Alphascript Publishing, 2011.
- [Dah76] P. R. Dahl. Solid friction damping of mechanical vibrations. *AIAA Journal*, 14(12) :1675–1682, 1976.
- [DDL10] C. Debain, P. Delmas, R. Lenain, and R. Chapuis. Integrity of an autonomous agricultural vehicle according the definition of trajectory traversability. In *Ageng 2010, international conference on agricultural engineering, 06/09/2010, clermont-ferrand, fra*, 2010.
- [Del10] P Delmas. *Génération active des déplacements d'un véhicule agricole dans son environnement*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, 2010.

- [DFMZ02] E. Dormegnien, G. Fandard, G. Mahajoub, and F. Zarka. Dynamique du véhicule. *Cours de l'IFMA*, 2002.
- [DOK98] J. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar. Controlling formations of multiple mobile robots. In *Ieee international conference on robotics and automation (icra), leuven (belgium)*, pages 2864–2869, 1998.
- [Ed00] M. Ellouze and B. d'Andréa-Novel. Control of unicycle-type robots in the presence of sliding effects with only absolute longitudinal and yaw velocities measurement. *European Journal of Control*, 6(6) :567–584, 2000.
- [EUY08] Y. Esin, M. Unel, and M. Yildiz. Formation control of multiple robots using parametric and implicit representations. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*, pages 558–565, 2008.
- [FBT97] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEER Robotics and Automation magazine*, 4(1) :23–33, 1997.
- [FDC<sup>+</sup>11] Hao Fang, Lihua Dou, Jie Chen, Roland Lenain, Benoit Thuilot, and Philippe Martinet. Robust anti-sliding control of autonomous vehicles in presence of lateral disturbances. *Control Engineering Practice*, 19(5) :468 – 478, 2011.
- [FM04] J. Fax and R. Murray. Information flow and cooperative control of vehicle formations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(9) :1465–1476, 2004.
- [Gil92] T.D. Gillespie. *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International, Warrendale, U.S.A., 1992.
- [GMM02] S. Golberg, M. Maimone, and L. Matthies. Stereo vision and rover navigation software for planetary exploration. In *The IEEE aerospace conference*, Big Sky, USA, 2002.
- [GU94] J. Guldner and V.I. Utkin. Stabilization of non-holonomic mobile robots using lyapunov functions for navigation and sliding mode control. In *Ieee conference on decision and control*, volume 3, pages 2967–2972, Buena Vista, Florida (USA), 1994.
- [Gui98] J. Guittet. *La robotique médicale*. Hermes Science Publications, 1998.
- [HCC<sup>+</sup>04] D.M. Helmick, Y. Cheng, D.S. Clouse, L.H. Matthies, and S.I. Roumeliotis. Path following using visual odometry for a mars rover in high-slip environments. In *Ieee aerospace conference*, volume 2, pages 772–778, Big Sky, Montana (USA), 2004.
- [HHK<sup>+</sup>09] H. Harada, H. Hirukawa, S. Kajita, S. Sakka, and K. Yokoi. *Introduction à la commande des robots humanoïdes - De la modélisation à la génération du mouvement*. Springer Verlag France, 2009.
- [HKLC98] H. Haddad, M. Khatib, S. Lacroix, and R. Chatila. Reactive navigation in outdoor environments using potential fields. In *IEEE international conference on robotics and automation*, Leuven (Belgium), 1998.
- [HLTM05] F. Hao, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet. Robust adaptive control of automatic guidance of farm vehicles in the presence of sliding. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3113–3118, Barcelona (Spain), 2005.

- [HLTM11] O. Hach, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet. Avoiding steering actuator saturation in off-road mobile robot path tracking via predictive velocity control. In *IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems*, volume accepted, to be published, 2011.
- [IRG<sup>+</sup>04] B. Innocenti, P. Ridao, N. Gascons, A. El-Fakdi, B. Lopez, and J. Salvi. Dynamical model parameters identification of a wheeled mobile robot. In *IFAC/EURON symposium on intelligent autonomous vehicles*, Lisboa, Portugal, 2004.
- [ISS08] K. Iagnemma, S. Shimoda, and Z. Shiller. Near-optimal navigation of high speed mobile robots on uneven terrain. pages 4098–4103, 2008.
- [JN97] Z.-P. Jiang and H. Nijmeijer. Tracking control of mobile robots : a case study in backstepping. *Automatica*, 33(7) :1393–1399, 1997.
- [KBA11] M. Krid and F. Ben-Amar. Design and control of an active anti-roll system for a fast rover. In *IEEE International Conference on Intelligent RObots ans Systems*, volume to be published, 2011.
- [KN00] N. Kiencke and L. Nielsen. *Automotive control system*. Springer, Berlin, 2000.
- [KZ00] A.J. Koshkouei and A.S.I. Zinober. Adaptive backstepping control of nonlinear systems with unmatched uncertainty. In *Ieee conference on decision and control*, volume 5, pages 4765–4770, 2000.
- [LGSB08] E. Lucet, C. Grand, D. Salle, and P. Bidaud. Stabilization algorithm for a high speed car-like robot achieving steering maneuver. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2540–2545, Pasadena, California (USA)., 2008.
- [LJM02] S. Lacroix, I.-K. Jung, and A. Mallet. Digital elevation map building from low altitude stereo imagery. *Robotics and Autonomous Systems*, 41(2-3) :119–127, 2002.
- [LL07] O. Lefebvre and F. Lamiroux. Localization and trajectory following for multi-body wheeled mobile robots. pages 3086–3091, 2007.
- [LLG<sup>+</sup>10] R. Lenain, E. Lucet, C. Grand, B. Thuilot, and F.B. Amar. Accurate and stable mobile robot path tracking : an integrated solution for off-road and high speed context. pages 196–201, 2010. cited By (since 1996) 0.
- [LPT<sup>+</sup>10] R. Lenain, J. Preynat, B. Thuilot, P. Avanzini, and P. Martinet. Adaptive formation control of a fleet of mobile robots : application to autonomous field operations. pages 1241–1246, 2010.
- [LSXL00] J. Lu, S. Sekhavat, M. Xie, and C. Laugier. Sliding mode control for nonholonomic mobile robot. In *Int. conf. on control, automation, robotics and vision*, Singapore, 2000.
- [LT01] R. Lozano and D. Taoutaou. *Identification et commande adaptative*. Hermes, Paris, 2001.
- [LTCM03a] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. Adaptive control for car like vehicles guidance relying on rtk gps : rejection of sliding effects in agricultural applications. In *Proceedings - ieee international conference on robotics and automation*, volume 1, pages 115–120, Taipei (Taiwan), 2003.



- [LTCM03b] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. Rejection of sliding effects in car like robot control : application to farm vehicle guidance using a single rtk gps sensor. In *Ieee/rsj international conference on intelligent robots and systems*, volume 4, pages 3811–3816, Las Vegas, Nevada (USA), 2003.
- [LTCM06] Roland Lenain, Benoit Thuilot, Christophe Cariou, and Philippe Martinet. High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding. Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks. *Autonomous robots*, 21(1) :79–97, 2006.
- [LTCM07] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. Adaptive and predictive path tracking control for off-road mobile robots. *European Journal of Control*, 13(4) :419–439, 2007.
- [LTCM10] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. Mixed kinematic and dynamic sideslip angle observer for accurate control of fast off-road mobile robots. *Journal of Field Robotics*, 27(2) :181–196, 2010.
- [LTHM11] R. Lenain, B. Thuilot, O. Hach, and P. Martinet. High-speed mobile robot control in off-road conditions : a multi-model based adaptive approach. In *EEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '11*, page 6143 :6149, 2011.
- [LW05] Chang Boon Low and D. Wang. Robust path following of car-like WMR in the presence of skidding effects. In *IEEE international conference on mechatronics*, pages 864–89, 2005.
- [MC00] I. Motte and G. Champion. Slow manifold approach for the control of mobile robots not satisfying the kinematic constraints. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6) :875–880, 2000.
- [MC02] A.J.P. Miège and D. Cebon. Design and implementation of an active roll control system for heavy vehicles. In *6th int. symposium on advanced vehicle control (avec)*, Hiroshima, Japon, 2002.
- [MDCD10] F. Malartre, P. Delmas, R. Chapuis, and C. Debain. Real-time dense digital elevation map estimation using laserscanner and camera slam process. pages 1212–1218, 2010.
- [MJNM08] K. N. M’Sirdi, B. Jaballah, A. Naamane, and H. Messaoud. Robust observers and unknown input observers for estimation, diagnosis and control of vehicle dynamics. In *IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 48–57, Nice, France, 2008.
- [MK07] S. Murata and H. Kurokawa. Self-Reconfigurable Robot : Shape-Changing Cellular Robots Can Exceed Conventional Robot Flexibility. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(1) :71–78, 2007.
- [MS93] A. Micaelli and C. Samson. Trajectory tracking for unicycle-type and two-steering-wheels mobile robots. *INRIA technical report*, (n° 2097), 1993.
- [MS00] P. Morin and C. Samson. Practical stabilization of a class of nonlinear systems. application to chain systems and mobile robots. In *Ieee conference on decision and control*, volume 3, pages 2989–2994, Orlando (Florida, USA), 2000.

- [MS01] P. Morin and C. Samson. Commande de véhicules sur roues non holonomes, une synthèse. In *Actes des troisièmes journées nationales de la recherche en robotique (JNRR), giens (france)*, 2001.
- [Mul92] N. Muller. Feedforward control for curve steering for an autonomous road vehicle. In *Ieee international conference on robotics and automation*, volume 1, pages 200–205, 1992.
- [NHT] Trends in static stability factor of passengers cars, light trucks and vans. Technical report, U.S. Department of transportation - National Highway Traffic Safety Administration.
- [OBA99] D. Odenthal, T. Bunte, and J. Ackermann. Nonlinear steering and braking control for vehicle rollover avoidance. In *European control conference (ecc)*, Karlsruhe : Allemagne, 1999.
- [Pac02] H. B. Pacejka. *Tire and vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers, 2002.
- [PBF<sup>+</sup>05] P. Martinet, B. Thuilot, F. Hao, M. Berducat, C. Cariou, C. Debain, R. Lenain, C. Tessier, A. Godin, F. B. Amar, F. Plumet, C. Grand, G. Besseron, S. Lacroix, and T. Peynot. R2M : Rover Multi-Modes pour une haute mobilité sur terrain accidenté. *Journées Bilan ROBEA*, 2005.
- [Pey06] T. Peynot. *Sélection et contrôle de modes de déplacement pour un robot mobile autonome en environnements naturels*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [Pha86] M. Pham. Modélisation mathématique du comportement dynamique d'une automobile dans le domaine non-linéaire. *Revue de la Société des Ingénieurs Automobile*, (40), 1986.
- [PI08] S.C. Peters and K. Iagnemma. Mobile robot path tracking of aggressive maneuvers on sloped terrain. pages 242–247, 2008. cited By (since 1996) 1.
- [Pou02] F. Pourboghrat. Exponential stabilization of nonholonomic mobile robots. *Computers and Electrical Engineering*, 28(5) :349–359, 2002.
- [Ric93] J. Richalet. *Pratique de la commande prédictive*. Traité des nouvelles technologies série automatique. Hermes, Paris, 1993.
- [RLTD11] M. Richier, R. Lenain, B. Thuilot, and C. Debain. On-line estimation of a stability metric including grip conditions and slope : Application to rollover prevention for All-Terrain Vehicles. In *IEEE International Symposium on Intelligent Robots and Systems - IROS'2011*, page to be published, 2011.
- [SABI08] A. Sproewitz, M. Asadpour, Y. Bourquin, and A. J. Ijspeert. An active connection mechanism for modular self-reconfigurable robotic systems based on physical latching. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008.
- [Sah04] E. Sahin. Swarm robotics : from sources of inspiration to domains of application. *Swarm Robotics, Proceedings of the SAB 2004 International Workshop, Lecture Notes in Computer Science*, 2004.
- [Sam93] C. Samson. Time-varying feedback stabilization of car-like wheeled mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 12(1) :55–60, 1993.

- [Sam95] Claude Samson. Control of chained systems. application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(1) :64–77, 1995.
- [SB04] P. Sardain and G. Bessonnet. Forces acting on a biped robot. center of pressure - zero moment point. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 34(5) :630–637, 2004.
- [SCS06] S. Solmaz, M. Corless, and R. Shorten. A methodology for the design of robust rollover prevention controllers for automotive vehicles : part 1-differential braking. In *45th IEEE conference on decision and control (cdc)*, San Diego, U.S.A., 2006.
- [SHR06] B. Schofield, T. Hagglund, and A. Rantzer. Vehicle dynamics control and controller allocation for rollover prevention. In *International conference on control applications*, Munich, Allemagne, 2006.
- [Sim96] R. Simmons. The curvature-velocity method for local obstacle avoidance. In *IEEE international conference on robotics and automation*, Mineapolis, MN (USA), 1996.
- [SKI07] S. Shimoda, Y. Kuroda, and K. Iagnemma. High-speed navigation of unmanned ground vehicles on uneven terrain using potential fields. *Robotica*, 25(4) :409–424, 2007.
- [SM05] C. Samson and P. Morin. Practical and asymptotic stabilization of chained systems by the transverse function control approach. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 43(1) :32–57, 2005.
- [SPB05] B. H. Schafer, M. Proetzsch, and K. Berns. Extension approach for the behaviour-based control system of the outdoor robot raven autonome mobile systeme, 2005.
- [Ste04] J. Stephant. *Contribution à l'étude et à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne (UTC), 2004.
- [Sus10] S. Susca. Gns-independent navigation solution using integrated lidar data. volume 1, pages 375–383, 2010.
- [TCD<sup>+</sup>06] C. Tessier, C. Cariou, C. Debain, F. Chausse, R. Chapuis, and C. Rousset. A real-time, multi-sensor architecture for fusion of delayed observations : application to vehicle localization. *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pages 1316–1321, 2006.
- [TL02] Y.P. Tian and S. Li. Exponential stabilization of nonholonomic dynamic systems by smooth time-varying control. *Automatica*, 38(7) :1139–1146, 2002.
- [TWH00] P.C. Tung, S.R. Wang, and F.Y. Hong. Application of mrac theory for adaptive control of a constrained robot manipulator. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(14) :430–448, 2000.
- [VCBSL11] T.A. Vidal-Calleja, C. Berger, J. Sola, and S. Lacroix. Large scale multiple robot visual mapping with heterogeneous landmarks in semi-structured terrain. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011. Article in Press.
- [Ven03] G. Venture. *Identification des paramètres dynamique d'une voiture*. PhD thesis, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, IRCCyN, 2003.

- [Vuk72] M. Vukobratovic. On the stability of anthropomorphic systems. *Mathematical biosciences*, (15) :1–37, 1972.
- [WB93] G.C. Walsh and L.G. Bushnell. Stabilization of multiple input chained form control systems. volume 2, pages 959–964, 1993. cited By (since 1996) 14.
- [WL07] D. Wang and C.B. Low. An analysis of wheeled mobile robots in the presence of skidding and slipping : Control design perspective. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2379–2384, Roma, Italy, 2007.